

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



Université Mohammed Seddik Ben Yahia - Jijel

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études

Pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction mécanique

Thème

*Etude expérimentale de l'effet du taux de
déformation sur la réponse d'un stratifié croisé*

Verre E/Epoxy sous compression dynamique

Les membres de jury :

Dr. R. BELHADEF (Président)

Dr. A. DELIOU (Examineur)

Dr. L. GUERAICHE (Encadrant)

Présenté par :

Youcef RIDA

Abdennour BELHOUCHE

Promotion juin 2020

Dédicaces

A mes très chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai pour vous.

Papa, rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être, t'étais toujours présent pour me ressourcer et me rassurer.

Mama, tel que tu es : honorable et aimable, tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence et la source de tendresse, de patience et de générosité.

Vous avez fait de moi la personne que je suis aujourd'hui, vos prières m'ont beaucoup aidé pour bien mener mes études.

Ce travail est le fruit des sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et ma formation.

Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver et vous accorder santé, bonheur et longue vie.

A mon frère Badreddine, à travers tes encouragements et ton humour tu m'as transmis un courage et une volonté indéterminables, tu m'as donné la force de continuer, tes qualités sont trop longues à énumérer, je suis chanceux et fier de t'avoir, que dieu te garde.

A mes chères sœurs Soumeya et Chafia « fifi », souriantes et rayonnantes comme vous êtes, merci d'être toujours à mes côtés pour me soutenir et m'écouter, je vous souhaite une grande réussite dans vos études et votre vie.

A mes grands-parents, symbole de courage et de persévérance.

A toute ma grande famille.

A mes amis et mes accompagnants de Constantine, malgré la distance vous étiez toujours présents avec moi par vos cœurs et vos conseils, je vous souhaite une carrière fascinante.

A mes amis : Abdou et aux membres du club TCJ.

A mes confrères et consœurs de la promotion GM 2018-2020.

RIDA Youcef

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents pour leurs encouragements permanents, leur soutien, leurs douaa et leurs sacrifices tout au long de mes études.

Toute ma famille.

Mes frères surtout mon frère Abdelmalik.

Tous mes enseignants.

Mon binôme : Youcef.

Mes amis surtout mon ami L. Moad.

Tous mes collègues.

BELHOUCHE Abdennour

Remerciements

Nous remercions avant tout Dieu le tout puissant de nous avoir guidés et illuminés le chemin afin de franchir tous les obstacles que nous avons rencontrés. Sa bénédiction nous a beaucoup aidé pour mener à bien ce travail.

Nos plus sincères remerciements et reconnaissances vont spécialement à notre directeur de thèse Dr. GUERAICHE Larbi maître de conférences à l'université Mohammed Seddik Ben Yahia (Jijel), pour la qualité de son encadrement, sa confiance, ses encouragements, ses orientations et son suivi malgré ses occupations. Veuillez trouver ici l'expression de notre respectueuse considération.

Nous tenons à remercier également l'ensemble du jury qui nous ont honorés par leur présence dans cette soutenance et d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail.

Nous exprimons notre gratitude à tous les enseignants du département de génie mécanique pour leur dévouement et leur assistance tout au long de notre cursus universitaire.

Et enfin, à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail et qui nous ont soutenus de près ou de loin, tout au long de cette année.

Liste des figures

Figure I.1: Composition des matériaux composites en général	2
Figure I.2: Types de matrices	3
Figure I.3: Structure chimique de l'époxyde DGEBA	5
Figure I.4: Renfort fibreux vu sous différentes échelles	7
Figure I.5: Types des renforts	7
Figure I.6: Filet en fibres de verre	8
Figure I.7: Principales orientations des fibres	9
Figure I.8: Principaux types d'armures utilisées pour le tissage des tissus	10
Figure I.9: Stratifiés croisés symétrique et antisymétrique	11
Figure I.10: Moulage au contact	12
Figure I.11: Moulage par projection	13
Figure I.12: Moulage sous vide ou « au sac »	13
Figure I.13: Enroulement filamentaire	14
Figure I.14: Schéma du moulage par infusion	15
Figure II.1: Schéma de la première barre de pression	17
Figure II.2: La barre développée par Bertram Hopkinson (1914)	18
Figure II.3: La barre adaptée par Kolsky (1949)	19
Figure II.4: Equilibre d'un élément unidimensionnel de barre	20
Figure III.1: Panneaux et échantillons fabriqués en verre E/époxy ($90^{\circ}/0^{\circ}$) ₂₀	27
Figure III.2: Pesée de l'échantillon mis en creuset.	28
Figure III.3: Mise en place de l'échantillon en creuset et fermeture du four Nobertherm du laboratoire de construction mécanique-Jijel.	28
Figure III.4: Réglage du cycle de calcination.	29
Figure III.5: Cycle de calcination du composite croisé ($90^{\circ}/0^{\circ}$) ₂₀ en verre E/époxy.....	29
Figure III.5: Disposition des 40 plis croisés au sein du stratifié ($90^{\circ}/0^{\circ}$) ₂₀ verre E/époxy de droite en gauche et de haut en bas.....	30
Figure III.7: Barre d'Hopkinson de compression	32
Figure III.8: Schéma de la barre de compression d'Hopkinson.	32

Figure IV.1 : Signaux typiques des jauges à P =1.3 bar.	34
Figure IV.2 : Courbes déformation-temps des essais de compression dans le plan par barre d'Hopkinson sur les éprouvettes (90°/0°) ₂₀ en verre E/époxy sous différentes pressions.	35
Figure IV.3 : Courbes vitesse-temps des essais de compression dans le plan par barre d'Hopkinson sur les éprouvettes (90°/0°) ₂₀ en verre E/époxy sous différentes pressions.	36
Figure IV.4 : Courbes force-temps des essais de compression dans le plan par barre d'Hopkinson sur les éprouvettes (90°/0°) ₂₀ en verre E/époxy sous différentes pressions.	37
Figure IV.5 : Reproductibilité des courbes contrainte-déformation des éprouvettes (90°/0°) ₂₀ en verre E/époxy pour les essais de compression dans le plan par barre d'Hopkinson sous les pressions : 1.3, 1.5, 1.6 et 2 bar.	38
Figure IV.6 : Courbes contrainte-déformation des éprouvettes (90°/0°) ₂₀ en verre E/époxy sous différents taux de déformation.	40
Figure IV.7 : Courbes taux de déformation-temps des éprouvettes (90°/0°) ₂₀ en verre E/époxy sous différentes pressions d'impact.	41
Figure IV.8 : Exemple de séquences de capture générées par la caméra ultra-rapide Photron Fastcam au cours d'un essai non endommageant.	41
Figure IV.9 : Variation du module de compression en fonction du taux de déformation	42
Figure IV.10 : Variation de la contrainte maximale en fonction du taux de déformation	43
Figure IV.11 : Variation de la déformation à la contrainte maximale en fonction du taux de déformation.	43

Liste des tableaux

Tableau I.1: Caractéristiques des résines thermoplastiques et thermodurcissables6

Tableau I.2: Caractéristiques mécaniques des filaments vierges9

Tableau III. 1 : Détermination de la fraction massique des fibres.30

Tableau III. 2: Paramètres des essais de compression dynamique par barres d'Hopkinson sur les éprouvettes croisées $(90^\circ/0^\circ)_{20}$ en verre E/époxy.33

Tableau IV.1 : Paramètres des essais de compression dynamique dans le plan par barre d'Hopkinson des éprouvettes croisées $(90^\circ/0^\circ)_{20}$ en verre E/époxy.39

Liste des symboles

L : Longueur de l'impacteur.

l_s : Longueur de l'éprouvette.

L_b : Longueur des barres élastiques.

d_b : Diamètre des barres élastiques.

Δx : Élément de la barre.

c_b : Vitesse de propagation du son/ondes dans les barres.

c_i : Vitesse de propagation du son/ondes dans la barre entrante.

c_0 : Vitesse de propagation du son/ondes dans la barre sortante.

ρ_b : Masse volumique des barres.

Z : Impédance acoustique des barres.

τ : Durée de l'onde.

A_b : Section des barres.

F_i : Force incidente (de la barre entrante).

F_0 : Force transmise (de la barre sortante).

V_i : Vitesse incidente (de la barre entrante).

F_0 : Vitesse transmise (de la barre sortante).

E : Module d'Young.

E_i : Module d'Young de la barre entrante.

E_0 : Module d'Young de la barre sortante.

E_b : Module de Young des barres.

E_c : Module d'Young ou module de compression de l'échantillon.

V_s : Vitesse de l'impacteur/Projectile.

σ : Contrainte technologique.

R_e : Limite élastique (des barres).

J : Moment d'inertie.

t : Temps.

ε : Déformation technologique.

$\dot{\varepsilon}$: Taux de déformation.

ε_i : Onde de déformation incidente.

ε_t : Onde de déformation transmise.

ε_r : Onde de déformation réfléchie.

A_s : Section du spécimen.
 L_s : Longueur d'échantillon.
 σ_v : Contrainte vraie.
 ε_v : Déformation vraie.
 W_1 : Poids du creuset à vide.
 W_2 : Poids du creuset avec l'échantillon avant calcination.
 W_3 : Poids du creuset avec l'échantillon après calcination.
 M_f : Taux ou fraction massique des fibres.
 V_f : Taux ou fraction volumique des fibres.
 W_f : Poids des fibres.
 W_m : Poids de la matrice.
 W_c : Poids de l'échantillon.
 ρ_f : Masse volumique des fibres.
 ρ_m : Masse volumique de la matrice.
 ρ_c : Masse volumique du composite.
 U_0 : Tension d'alimentation du demi-pont.
 ΔEm : Tension de sortie du demi-pont.
 k : Facteur de la jauge.
 k_{inc} : Facteur de la jauge de la barre incidente.
 k_{trans} : Facteur de la jauge de la barre transmise.
 P : Pression d'essai.
 E : Epaisseur de l'échantillon (Dimension).
 H : Hauteur de l'échantillon.
 L : Largeur de l'échantillon.
 σ_{max} : Contrainte maximale.
 $\varepsilon_{\sigma_{max}}$: Déformation qui correspond à la contrainte maximale.

Liste des abréviations

SHPB: Split Hopkinson Pressure Bar.

UP : Polyester.

EP : Epoxyde.

DGEBA : Epoxyde Diglycidyl Ether de Bisphénol A

PS : Polystyrène.

PE : Polyéthylène.

PA : Polyamide.

PVC : Polychlorure de vinyle.

PP : Polypropylène.

PMMA : Polyacrylate de méthyle.

PC : Polycarbonate.

ABS : Copolymère de styrène, butadiène et acrylonitrile.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

FFT: Fast Fourier Transformation.

GFRP: Glass Fiber Reinforced Polymer.

GRE: Glass Reinforced Epoxy.

Table des matières

Dédicaces	I
Remerciements	III
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	VI
Liste des symboles	VII
Liste des abréviations	IX
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur les composites

I.1. Introduction.....	2
I.2. Matériaux composites	2
I.2.1. Définition	2
I.2.2. Caractéristiques générales.....	2
I.3. Constituants d'un matériau composite.....	3
I.3.1. Matrice	3
I.3.1.1. Types de résines organiques	4
I.3.1.2. Caractéristiques des résines thermoplastiques et thermodurcissables	6
I.3.2. Renfort	6
I.3.2.1. Types de renforts.....	7
I.3.2.2 Architecture des renforts	9
I.3.3. Stratifiés croisés	10
I.4. Domaines d'application des composites verre E/époxy	11
I.4.1. Electronique	11
I.4.2. Sports-loisirs	11
I.4.3. Navigation spatiale, maritime et aérienne.....	11
I.4.4. Construction.....	11
I.4.5. Chimie.....	12
I.4.6. Décoration.....	12
I.4.7. Transport.....	12
I.5. Procédés de fabrication des structures composites	12
I.5.1. Moulage au contact.....	12

I.5.2. Moulage par projection	12
I.5.3. Moulage sous vide ou « au sac »	13
I.5.4. Enroulement filamentaire	13
I.5.5. Moulage par infusion	14
I.6. Conclusion	15
I.7. Références bibliographiques	15

Chapitre II : Essai de compression par barres d’Hopkinson

II.1. Introduction	17
II.2. Définition.....	17
II.3. Historique des barres d’Hopkinson	17
II.4. Principe de l’essai SHPB	19
II.5. Approches de validité d’un essai de compression par barres d’Hopkinson	23
II.6. Conclusion	24
II.7. Références bibliographiques.....	25

Chapitre III : Techniques expérimentales

III.1. Introduction	27
III.2. Matériau et procédé d’élaboration.....	27
III.3. Calcination des éprouvettes.....	27
III.3.2. Cycle de calcination	28
III.3.3. Fraction massique des fibres	30
III.3.4. Fraction volumique des fibres (ASTM D2584)	31
III.4. Essais de compression dynamique par barres d’Hopkinson	31
III.5. Paramètres des essais sur éprouvettes croisées (90°/0°) ₂₀ en verre E/époxy testées dans .. le plan	33

Chapitre IV : Résultats expérimentaux et discussion

IV.1. Introduction.....	34
IV.2. Signaux typiques des jauges	34
IV.3. Paramètres locaux des essais.....	35

IV.4. Reproductibilité des courbes contrainte-déformation	38
IV.5. Comportement dynamique des stratifiés croisés.....	40
IV.6. Variation des paramètres dynamiques en fonction de la vitesse de déformation	42
Conclusion générale	44
Résumé	

Introduction générale

Le marché des composites est devenu l'un des plus grands marchés du monde grâce à la combinaison des meilleures caractéristiques de leurs constituants. Parmi ces composites, on trouve l'époxy renforcée par des fibres de verre qui fera l'objet de cette étude. L'intégration des fibres à module élevé dans la matrice polymère époxy donne au composite des propriétés mécaniques spécifiques meilleures que celles des constituants. Vu les avantages qu'offrent les composites par rapport aux matériaux métalliques classiques comme la légèreté, haute résistance spécifique, résistance à la corrosion, ils ne cessent de trouver des applications variées dans la construction des structures aéronautiques, aérospatiales, militaires et maritimes, etc.

La garantie du service à long terme des installations à base de structures composites nécessite la maîtrise de leur comportement/ réponse aux différentes sollicitations y comprises celles dynamiques de l'impact dû à la collision avec d'autres structures (crash, impact des oiseaux) et explosions, etc. Ce mémoire porte sur l'étude expérimentale de l'effet du taux de déformation sur la réponse d'un stratifié croisé verre E/Epoxy sous compression dynamique. Il est agencé en quatre chapitres.

Le premier chapitre rassemble les éléments de la bibliographie nécessaires à la compréhension de notre étude. Il porte sur les constituants d'un composite en termes de matrice et renfort, d'architecture de renforcement voire la stratification croisée, des applications à base de composites verre E/époxy, et de procédés de fabrication des composites comme le procédé de moulage par infusion à utiliser pour fabriquer nos stratifiés croisés.

Le deuxième chapitre est dédié au principe de l'essai de compression par barre d'Hopkinson, son historique, ses équations de calcul et ses approches de validité.

Le troisième chapitre se base sur les techniques expérimentales utilisées : la calcination, le calcul des fractions massique et volumique des fibres, l'élaboration des plaques composites et la découpe des éprouvettes, et les paramètres de dépouillement des essais de compression dynamique des stratifiés GRE croisés.

Le quatrième chapitre est consacré à la discussion des résultats des essais de compression dynamique par barres d'Hopkinson pour les stratifiés croisés verre E/époxy. Il traite leur répétabilité et analyse leur comportement non endommageant en se basant sur les courbes contrainte-déformation et vitesse de déformation-temps tout en mettant en évidence l'effet du taux de déformation sur les propriétés dynamiques.

Chapitre I
Généralités sur les
composites

Chapitre I : Généralités sur les composites

I.1. Introduction

Ce premier chapitre rassemble les éléments de la bibliographie nécessaires à la compréhension de notre étude. Il commence par la définition de ce que c'est qu'un composite tout en décrivant ses caractéristiques principales. Puis, il décrit les constituants d'un composite ; matrice et renfort, en allant du général vers le cas étudié « verre E/époxy ». Les architectures de renforcement sont succinctement présentées. Le cas des stratifiés croisés est traité. Certaines applications à base de composites verre E/époxy sont décrites. Enfin, ce premier chapitre est terminé par l'explication des procédés de fabrication des composites y compris le procédé de moulage par infusion utilisé pour fabriquer nos stratifiés croisés.

I.2. Matériaux composites

I.2.1. Définition

Un matériau composite est l'assemblage d'au moins de deux matériaux de natures différentes « Renfort + matrice » dont les propriétés se complètent pour former un matériau ayant des caractéristiques spécifiques bien supérieures à celles des composants pris séparément [1]. On désigne par caractéristique spécifique, la propriété mécanique d'un matériau rapportée à son poids.

I.2.2. Caractéristiques générales

En général, un matériau composite est constitué d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. Pour les phases discontinues de natures différentes, le composite s'appelle hybride. La phase discontinue est souvent plus dure et de propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée matrice. Néanmoins, la phase discontinue s'appelle renfort ou matériau renforçant ; Figure I.1.

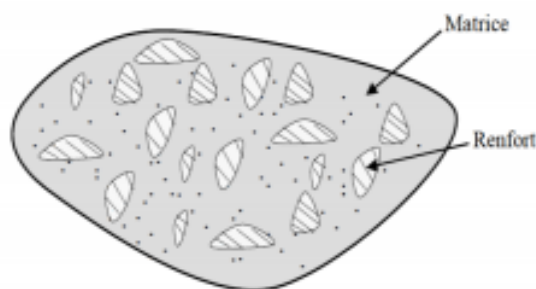


Figure I.1: Composition des matériaux composites en général [2].

Chapitre I : Généralités sur les composites

Les propriétés des matériaux composites résultent des propriétés des matériaux constituants, de leur distribution géométrique, et de leurs interactions [1].

I.3. Constituants d'un matériau composite

Le matériau composite est composé d'une matrice et d'un matériau de renforcement. La matrice elle-même se compose d'une résine (polyester, époxyde, etc.) et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de la résine tout en diminuant le coût de production. Le matériau composite est considéré comme composé d'une matrice et d'un renfort car la résine et la charge sont homogènes [1].

I.3.1. Matrice

La matrice est une phase continue qui réunit les fibres par ses caractéristiques cohésives et adhésives. Elle maintient les fibres dans leur orientation et leur position prévues pour les charges appliquées. Ses autres rôles consistent à assurer la cohésion, transférer et répartir les contraintes, protéger les renforts des agressions extérieures et fournir une résistance à la propagation de fissures. En général, la matrice détermine la limite de la température d'usage du matériau [3]. La Figure I.2 récapitule l'ensemble de familles des matrices.

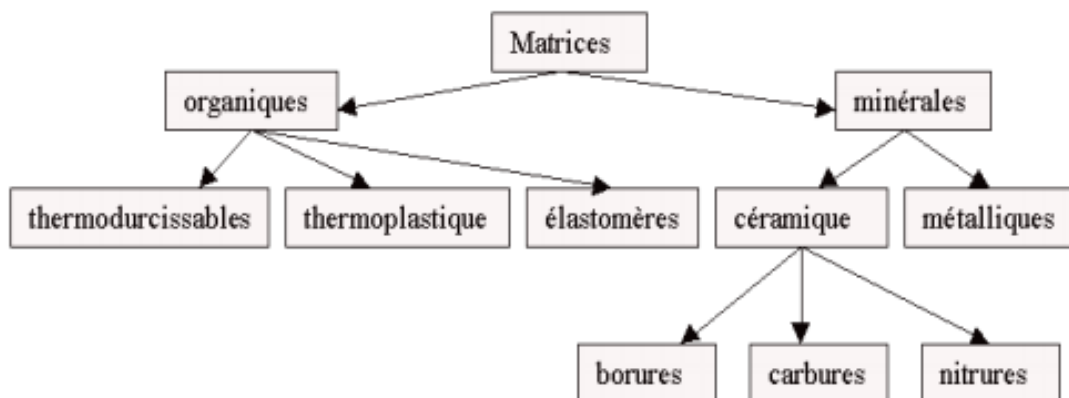


Figure I.2: Types de matrices [3].

Les matériaux composites doivent être protégés de l'environnement extérieur. Pour cela, on utilise entre autres comme matrices des résines pour transférer les sollicitations mécaniques aux fibres ; elles doivent donc être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres. De plus, leur densité doit être faible afin d'assurer et maintenir les propriétés mécaniques spécifiques élevées du composite [1]. Vu notre

Chapitre I : Généralités sur les composites

étude, on se limite dans ce mémoire juste aux matrices organiques thermodurcissables et thermoplastiques

I.3.1.1. Types de résines organiques

1.3.1.1.1. Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables sont mises en forme par chauffage lors d'une transformation irréversible [4]. Les principales résines thermodurcissables utilisées dans les matériaux composites sont :

a) Résines polyesters (UP)

Pour matériaux composites, les résines polyesters insaturées viennent en tête dans la mise en œuvre. Leur développement est le résultat [1]:

- d'un faible coût de production,
- de leur diversité offrant de multiples possibilités,
- d'une adaptation à des procédés de fabrication faciles à mettre en œuvre et à automatiser. Les résines polyesters sont classées en : résines souples, résines semi-rigides et résines rigides (les plus utilisées).

b) Résines de condensation

Les résines de condensation comprennent la résine phénolique (PF), l'aminoplaste et la résine furanique [1].

c) Résines époxydes (EP)

Après la résine polyester insaturée, la résine la plus utilisée est la résine époxy. A cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyesters), elles ne représentent que 5% du marché des composites. Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, elles sont utilisées pour les composites à hautes performances (Constructions aéronautiques, aérospatiales et militaires, ... etc.) [1]

Les résines époxydes sont formées de deux composants au minimum ; une résine et un durcisseur, et d'au moins deux groupes époxydes très réactifs, généralement obtenus en faisant réagir l'épichlorhydrine avec un diol (comme le bisphénol) sous la forme d'un éther glycidyle. L'époxy est un composé comprenant un atome d'oxygène relié à deux atomes de carbone en formant un pont [5]. La Figure I.3 illustre un exemple de la structure chimique de l'époxyde diglycidyl éther de bisphénol A (DGEBA).

Chapitre I : Généralités sur les composites

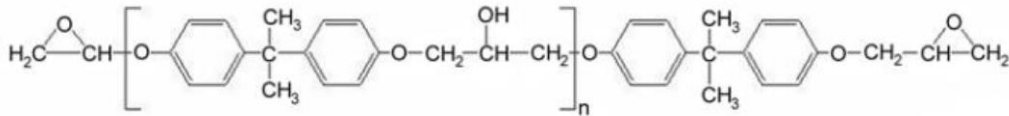


Figure I.3: Structure chimique de l'époxyde DGEBA [6].

Le catalyseur initie la réticulation cependant le durcisseur l'accélère afin de relier les chaînes monomères en un réseau tridimensionnel réticulé (Polymère). Ils peuvent être de nature chimique très variable (amine, anhydride...). Le choix d'un durcisseur est un compromis entre plusieurs caractéristiques : viscosité du mélange réactif, durée de vie en pot du mélange, réactivité du système lors de la mise en œuvre, et propriétés finales [5].

Parmi les avantages des résines époxydes, on peut citer :

- L'adhésion excellente et rapide avec faible contraction [5],
- Les bonnes propriétés mécaniques telles que la résistance au cisaillement et à la fatigue,
- Le faible retrait,
- La tenue en T° supérieure aux polyesters,
- La bonne tenue à basse température,
- La bonne résistance à la corrosion,
- La bonne adhésion aux fibres et matériaux divers, et la bonne résistance à l'abrasion (dureté de surface) [7].

Cependant, les résines époxydes présentent les *inconvénients* ainsi [7]:

- Temps de polymérisation plus long que le polyester,
- Prix relativement élevé,
- Allergies et dermatoses possibles selon la sensibilité,
- Dégazage utile,
- Viscosité élevé,

1.3.1.1.2. Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques se composent de fibres courtes et longues (des granulés). Ces résines présentent une aptitude à se mouler facilement à l'état liquide par plasticité. Leur mise en œuvre se fait en général par injection à haute pression. Parmi les résines thermoplastiques les plus usuelles sur le marché local, on trouve [8]:

- Le polystyrène (PS).

Chapitre I : Généralités sur les composites

- Le polyéthylène (PE).
- Le polyamide (PA)
- Le polychlorure de vinyle (PVC),
- Le polypropylène (PP).
- Polyacrylate de méthyle (PMMA),
- Polycarbonate (PC),
- Le copolymère de styrène, butadiène et acrylonitrile (ABS)

Pour une liste plus exhaustive des thermodurcissables, il est possible de se référer à [8]

1.3.1.2. Caractéristiques des résines thermoplastiques et thermodurcissables

Les principales caractéristiques des deux catégories de résines thermoplastiques et thermodurcissables sont résumées au Tableau I.1.

Critères essentiels	Matrices thermoplastiques	Matrices thermodurcissables
Etat de base	Solide (prêt à emploi : polymérisé)	Liquide visqueux à polymériser
Stockage matière de base	Illimité	Temps réduit (précautions à prendre)
Mouillabilité des renforts	Difficile	Aisée
Moulage	Chauffage (fusion + refroidissement de fixation)	Chauffage continu
Cycle	Plus long (refroidissement)	Court
Tenue en choc	Assez bonne	Limitée
Recyclage	Recyclables	Non recyclables

Tableau I.1: Caractéristiques des résines thermoplastiques et thermodurcissables [1].

Les résines thermostables sont connues par leurs performances thermiques qui conservent leurs propriétés mécaniques pour des températures plus élevées que 200°C ce qui les distingue des autres résines. Dans la pratique, nous les retrouvons parmi les résines des deux grandes familles de résines thermoplastiques et thermodurcissables [1].

I.3.2. Renfort

Un renfort présente une phase discontinue et souvent filamentaire à très hautes caractéristiques mécaniques. Selon l'échelle d'observation, on obtient des arrangements

Chapitre I : Généralités sur les composites

particuliers. A une échelle microscopique, on observe des fibres d'un diamètre de l'ordre de 10 μm constituées de verre, de carbone ou d'aramide. En atteignant l'échelle mésoscopique (de l'ordre de 1 mm), les fibres sont regroupées en 1 000 à 10 000 faisceaux pour former des mèches ou des torons. Ce sont ces torons qui assurent les contraintes mécaniques du composite (résistance et rigidité, tenue aux chocs) [7,9]. A l'échelle macroscopique, c'est un empilement de plis. La Figure I.4 montre un pli sous forme d'un tissu composé de torons en chaînes et trames.

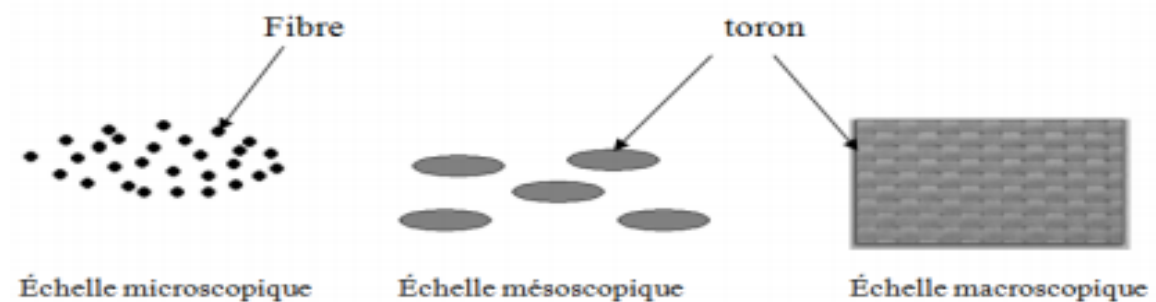


Figure I.4: Renfort fibreux vu sous différentes échelles [7].

1.3.2.1. Types de renforts

Le renfort est le squelette du composite ; c'est lui qui confère au matériau composite ses performances mécaniques élevées telles que : rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc. Les renforts peuvent être d'origines diverses : végétale, minérale, artificielle, synthétique, etc. [1]. Les renforts sont en général utilisés sous forme de fibres ou formes dérivées.

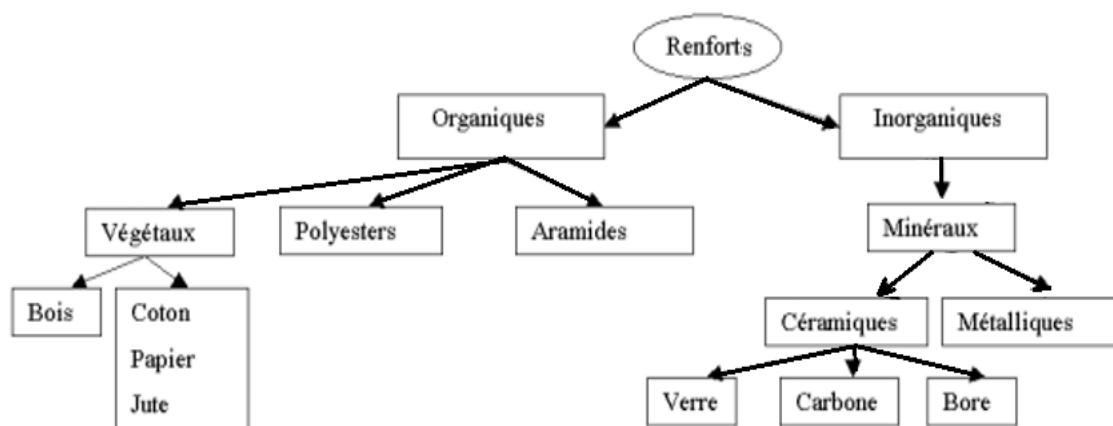


Figure I.5: Types des renforts [7].

Chapitre I : Généralités sur les composites

La Figure I.5 résume les différents types de renforts. On peut distinguer cinq grandes classes de fibres à savoir :

- Les fibres de carbone.
- Les fibres de verre.
- Les fibres d'aramide.
- Les fibres céramiques.
- Les fibres végétales.

Toutefois, on s'intéresse dans ce chapitre bien particulièrement au renfort en fibre de verre.

I.3.2.1.1. Fibres de verre

Le renfort en fibres de verre est utilisé dans plus de 95% des composites [10]. Les fibres de verre sont fabriquées à partir d'un mélange à base de silice (SiO_2), fondue à une température de 1200°C puis passée dans une filière en platine où les filaments sont étirés avant refroidissement [2,3].

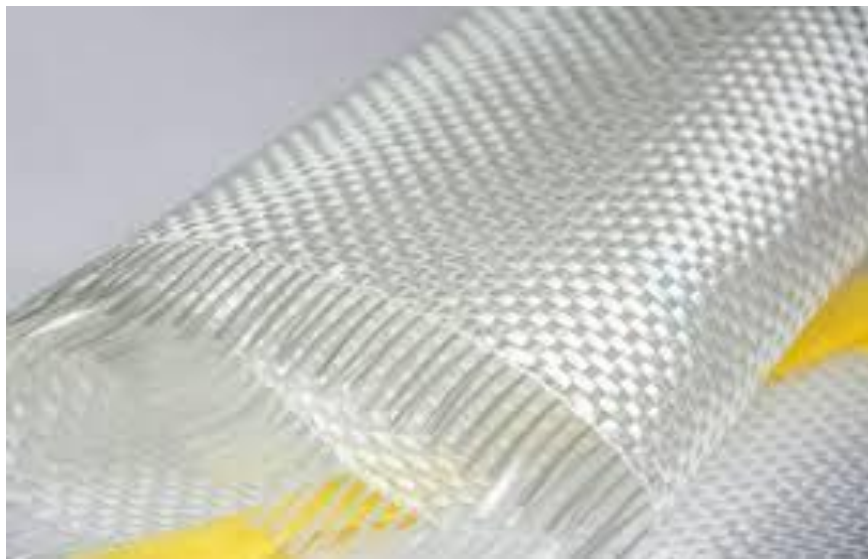


Figure I.6: Filet en fibres de verre [11].

En faisant varier la composition du mélange (silice, kaolin, chaux...etc.), on peut obtenir différents types de verres [1]:

- E** : À usage général, bonnes propriétés d'isolation électriques.
- D** : Hautes propriétés diélectriques (appareillages électroniques à très hautes performances, ex : radôme).
- A** : Alkali résistant.

Chapitre I : Généralités sur les composites

C : Résistance chimique (Séparateurs de batterie).

S : Haute résistance mécanique.

R : Haute résistance mécanique (Aérospatiale, aéronautique et armement).

Le Tableau I.2 résume les différentes caractéristiques mécaniques en fonction du type de verre.

	Types de verre					
	E	D	A	C	R	S
Contrainte à la rupture en traction (MPa)	3 200 à 3400	2600	3100	3300	4400	4600
Module d'élasticité en traction (GPa)	72 à 73	66	70.3	70.3	86	87
Taux d'allongement à la rupture en traction (%)	4.6 à 4.8	4.6	4.4	4.8	5.2	5.4

Tableau I.2: Caractéristiques mécaniques des filaments vierges [3].

1.3.2.2 Architecture des renforts

Sachant que la structure des composites est anisotrope. La texture et la géométrie des matériaux de renforcement doivent être utilisées pour créer une structure appropriée, car la plupart des matériaux de renforcement peuvent bien fonctionner en traction, mais sont moins résistants en compression et en cisaillement. [3].

Il existe plusieurs sortes de géométries et textures de renforts tels qu'ils sont illustrés sur la Figure I.7 [2]:

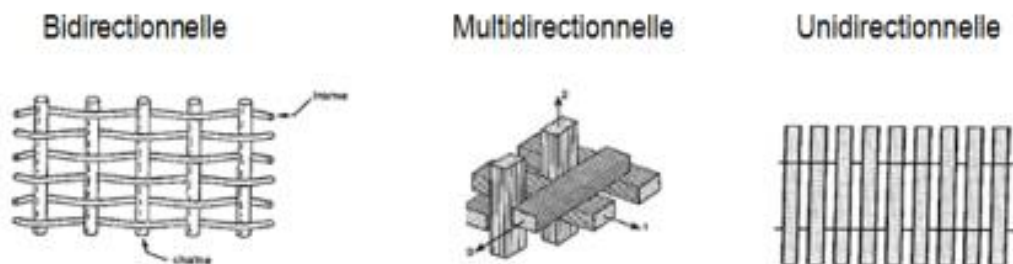


Figure I.7: Principales orientations des fibres [2].

Chapitre I : Généralités sur les composites

a) Unidirectionnelle (1D)

Les fibres ont la même direction ; elles sont parallèles et peuvent avoir deux formes :

- Sans liaison particulière (Roving).
- Reliées par un fil (Nappes).

b) Multidirectionnelle aléatoire

Les fibres sont disposées dans trois directions. Elles peuvent prendre les formes suivantes :

- Fibres broyées et coupées sans dispositions particulières,
- Feutre de fibres agglomérées par un liant : le mat peut être à fibres courtes sans orientation particulière ou à fibres continues.

c) Tissu

Le tissu comporte des fils de chaîne ou de trame (fibres bidirectionnelles). Suivant le mode de croisement de la trame et de la chaîne, le tissu sera une toile ou taffetas, un sergé, un satin, une armure croisée ou une armure unidirectionnelle ; voir Figure I.8.

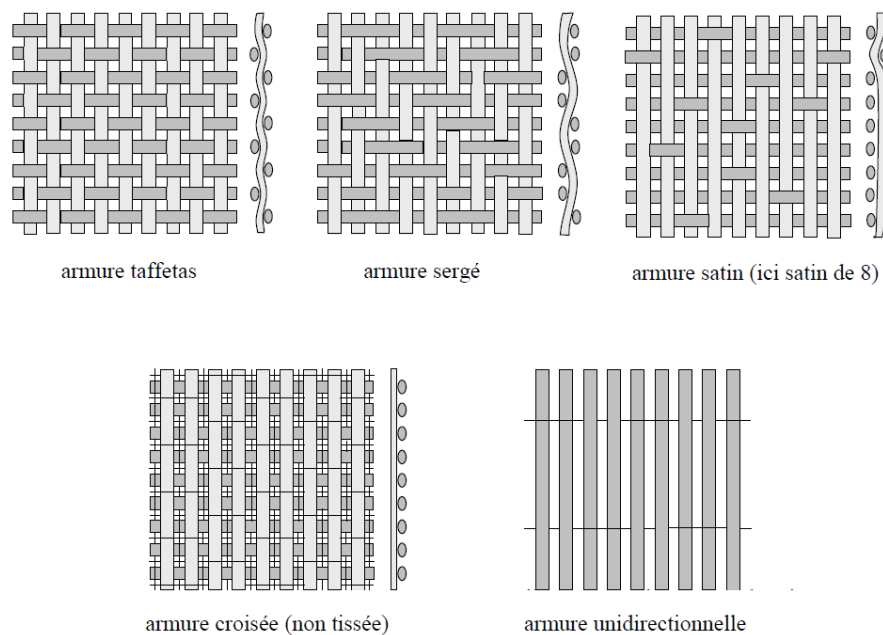


Figure I.8: Principaux types d'armures utilisées pour le tissage des tissus [1].

I.3.3. Stratifiés croisés

Un stratifié est un matériau constitué d'un empilement de couches (ou de plis) imprégnées de résines [1]. La désignation d'un stratifié commence par convention du bas en haut.

Chapitre I : Généralités sur les composites

Il existe plusieurs types de stratifiés mais on se limite dans ce chapitre aux stratifiés croisés. Un stratifié croisé est constitué de couches avec des orientations alternées de 0° et 90° dans la direction principale par rapport à la direction de référence du stratifié. On parle d'un stratifié symétrique si le nombre de pli est impair (Figure I.9 a) et antisymétrique s'il est pair (Figure I.9 b).

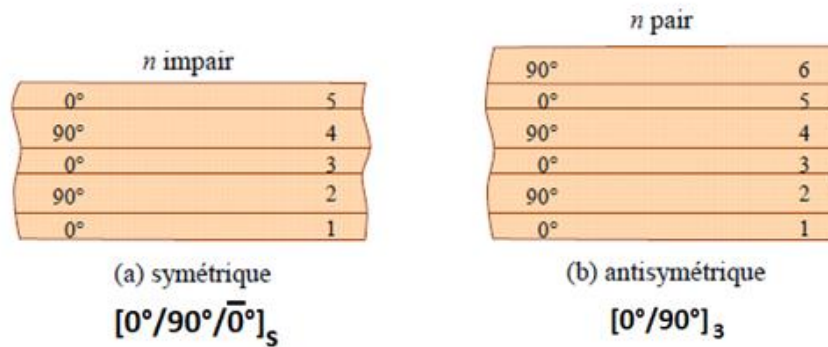


Figure I.9: Stratifiés croisés symétrique et antisymétrique [1].

I.4. Domaines d'application des composites verre E/époxy

Parmi les domaines d'application des composites verre E/époxy, on trouve :

I.4.1. Electronique

Hardware circuit imprimé : Le CI est la méthode standard de fabrication des cartes électroniques. Dans sa forme de base, il se présente sous forme d'une feuille de résine époxy renforcée de fibres de verre isolantes, avec une couche de cuivre sur une face [12].

I.4.2. Sports-loisirs

Grace au matériaux composites plusieurs équipements de sport ont été développés, comme les raquettes, cannes à pêche, raquettes... etc. La quasi-totalité de ces instruments sont fabriqués de résines époxydes renforcées par des fibres de verre ou de carbone.

I.4.3. Navigation spatiale, maritime et aérienne

Les polyépoxydes sont fortement utilisés dans les installations maritimes, ainsi que dans les avions, les satellites, les fusées et leur structure constitutif.

I.4.4. Construction

Parmi ses applications en construction, l'époxyde est utilisé pour les revêtements de sols et la conception de pales d'éoliennes.

Chapitre I : Généralités sur les composites

I.4.5. Chimie

Les polymères époxydes sert aussi à la fabrication des tuyauteries et des citernes de stockage, ainsi que le revêtement extérieur/intérieur des pipelines

I.4.6. Décoration

Les résines polyépoxydes jouent un grand rôle dans la décoration des différents meubles et la fabrication des tables rivière ainsi que leurs personnalisations.

I.4.7. Transport

Malgré la diversité des voitures et leurs pièces, l'époxyde participe en force à leurs fabrications, surtout pour les carrosseries et d'autres différentes parties, ainsi que pour la fabrication des chemins de fer des trains. Avec sa plus grande solidité et sa résistance aux chocs, l'époxyde peut être le matériau de transport idéal [13].

I.5. Procédés de fabrication des structures composites

I.5.1. Moulage au contact

Ce procédé, schématisé sur la Figure I.10, consiste à déposer sur le moule [9] :

- Une couche de surface (gel coat).
- La couche continue de matériau de renforcement est immergée par un rouleau de résine polymère environnementale.

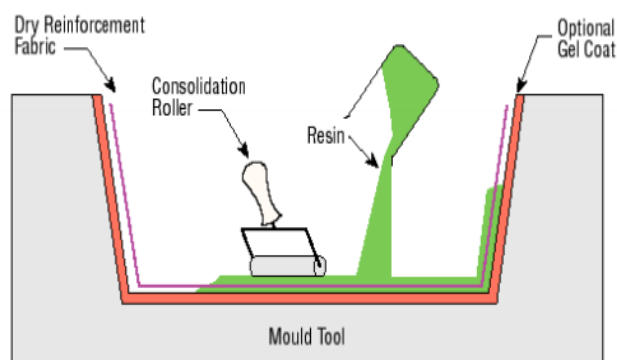


Figure I.10: Moulage au contact [9].

I.5.2. Moulage par projection

Comme le montre la figure I.11, l'utilisation d'un pistolet de pulvérisation pour pulvériser simultanément sous forme de fibres coupées, la résine catalytique et le matériau de renforcement. [9].

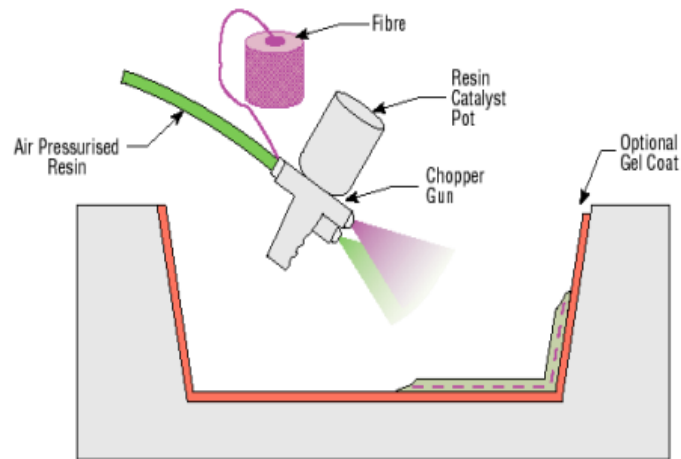


Figure I.11: Moulage par projection [9].

I.5.3. Moulage sous vide ou « au sac »

Ce procédé représenté à la Figure I.12 se déroule comme suit :

- Empilement des tissus ou nappes pré-imprégnées (phase de drapage).
- Couverture de l'ensemble par une membrane souple « sac » et étanche par des joints.
- Application d'une pression à l'aide d'une pompe à vide afin de dégager les bulles d'air et assurer l'imprégnation homogène des plis du stratifié. Couramment, il suffit d'appliquer un vide de 1 bar. Cependant, il fallait 7 bars ou plus en autoclave [9].

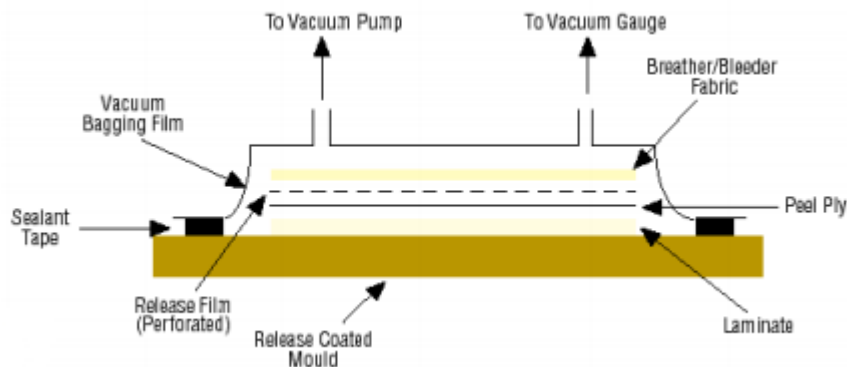


Figure I.12: Moulage sous vide ou « au sac » [9].

I.5.4. Enroulement filamentaire

Ce procédé d'enroulement filamentaire schématisé à la Figure I.13 est adapté aux pièces de révolution comme les pipes. Il consiste à enrouler un renfort continu imprégné de résine sur un mandrin tournant. Le taux volumique des fibres peut atteindre 85%. Entre autres, il est utilisé pour la fabrication des mâts des bateaux à voile et les cannes à pêche [9].

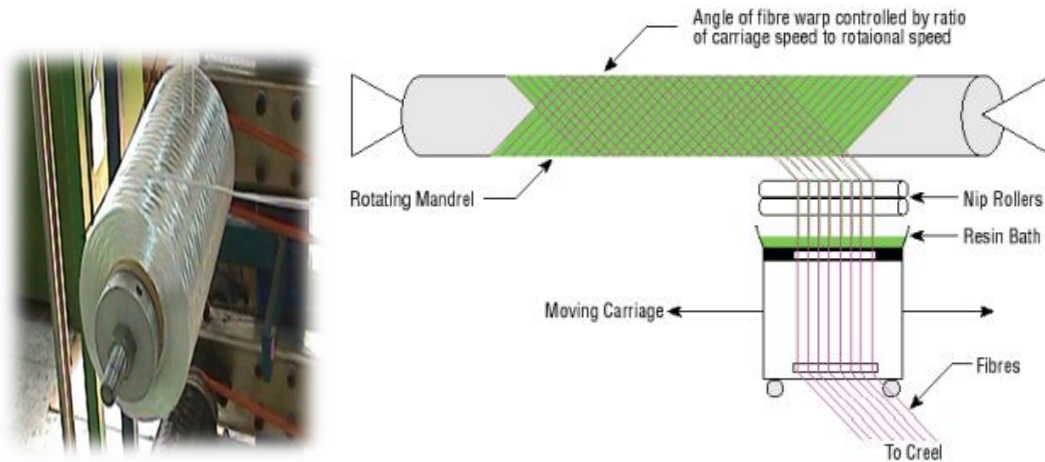


Figure I.13: Enroulement filamentaire [9].

I.5.5. Moulage par infusion

Cette méthode s'impose de plus en plus comme une alternative économique pour la fabrication des grandes pièces ayant un taux de fibres important (pales d'éolienne, voilures d'avion...). Elle diffère des autres méthodes d'injection en ce qu'une dépression (injection) est appliquée au trou d'évent (infusion). Elle ne nécessite ni l'utilisation d'un contre-moule ni d'une étuve, ce qui diminue les coûts d'investissement. Ceci permet aussi d'infuser de grandes pièces sans être limité par la taille de l'étuve ou de l'autoclave. Plusieurs types de résines thermodurcissables peuvent être utilisées. Dans la plupart des cas, il s'agit de la résine époxy ou de la résine polyamide [12, 13].

Le moulage par infusion schématisé à la Figure I.14 se déroule comme suit [15] :

- Mise en place du renfort et des produits d'environnement (drainant, micro-perforé, tissus d'arrachage, bâche à vide...).
- Positionnement des événements.
- Mise sous vide du système qui peut permettre une compaction du renfort.
- Montée en température de la résine jusqu'à la viscosité adéquate.
- Insertion de la résine par dépression ; ce qui crée un écoulement visqueux dans le filet drainant, de type milieu poreux, principalement transversal au sein du renfort.
- Cuisson (réticulation) du composite.
- Démoulage.

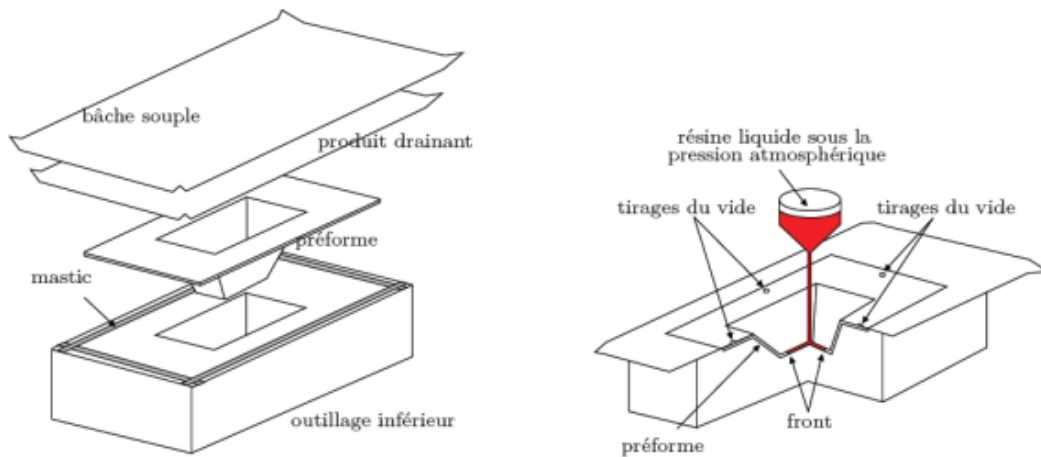


Figure I.14: Schéma du moulage par infusion [15].

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre de synthèse bibliographique, nous avons suivi une démarche graduelle pour se familiariser avec les composites en général et bien particulièrement les composites verre/ époxy. Via ce chapitre, c'est rendu facile de comprendre les familles des renforts et matrices surtout le renfort en fibre de verre E et la matrice thermodurcissable « époxy » ainsi que les stratifiés croisés. En plus, on a cité quelques applications à base de verre E/époxy pour mettre le lecteur en situation. On n'a pas oublié aussi d'expliquer les principaux procédés de mise en œuvre des composites y compris le procédé de moulage par infusion. Bref, ce chapitre est un bon support pour la partie méthode de cette étude expérimentale.

I.7. Références bibliographiques

- [1] B. Jean-Marie, « Mécanique des Matériaux et Structures Composites ». Le Mans, France : Lavoisier, 2013.
- [2] M. Darwiche, « Apprentissage statistique pour l'évaluation et le contrôle non destructifs : application à l'estimation de la durée de vie restante des matériaux par émission acoustique sous fluage », Thèse de doctorat, Université du Maine, 2013.
- [3] P. Prombut, « Caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites multidirectionnels », Thèse de doctorat, Université de Toulouse III - Paul Sabatier, 2007.

Chapitre I : Généralités sur les composites

- [4] L. Merad, « Etude par spectroscopie Raman et modélisation d'une résine composite RTM », Thèse de doctorat, Université d'Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2010.
- [5] M. Velten, « Résines époxydiques », Nancy, 10 janvier 2005, Consulté le : juin 22, 2020. [En ligne]. Disponible sur : <https://slideplayer.fr/slide/506187/>.
- [6] S. Grishchuk, Z. Mbhele, S. Schmitt, et J. Karger-Kocsis, « Structure, thermal and fracture mechanical properties of benzoxazine-modified amine-cured DGEBA epoxy resins. », *Express Polym. Lett.*, vol. 5, n° 3, 2011.
- [7] C. Aribi, « Etude comparative du comportement des différents matériaux composites (différentes matrices) », Mémoire de Magister, Université de M'Hamed Bougara, Boumerdes, 2011.
- [8] Bgani, « Banque de données CAPLAST-Caractéristiques des plastiques », *Techniques de l'ingénieur*, vol. CD AM 3305. p. 1-4, 05 juillet 2002.
- [9] C. Rui Pedro, « Les matériaux composites dans l'industrie des sports et loisirs », présenté à Congrès RFIS, juin 2005.
- [10] B. Louis, de M. Bertrand, et N. Stanislas, « L'industrie française des matériaux composites-Des enjeux prioritaires pour un développement durable », *Rév.* 2, mai 2002.
- [11] « Fibre de verre Woven Roving HL-Plasto | Fibre de verre, résine epoxy et polyester », *HL-Plasto | Fibre de verre, résine d'epoxy et polyester*. <https://hl-plasto.com/woven-roving/> (consulté le 22 juin 2020).
- [12] « PIC Microcontrollers - 3rd Edition ». <https://www.elsevier.com/books/pic-microcontrollers/bates/978-0-08-096911-4> (consulté le 22 juin 2020).
- [13] G. K. Tirumalasetty, « Application of glass fiber reinforced epoxy composite in manufacture of train compartments », présenté à Conference : Innovations in Glass organized by Glass Manufacturing Industry Council, Center for Glass Research and NSF International Materials Institute of New Functionality in Glasses, At : Westerville, Ohio, Juin 2005.
- [14] D. Arnaud, « Simulation industrielle des procédés d'élaboration de pièces composites par infusion de résine : couplage fluide / solide poreux très faiblement perméable en grandes déformations », Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Saint-Etienne, 2013.
- [15] R. Beltrame, « Modélisation 3D du procédé d'infusion », Mémoire de Master 2, Université d'Henri Poincaré NANCY, Institut Clément Ader ALBI, 2012.

Chapitre II

Essai de compression par barres d'Hopkinson

Chapitre II : Essai de compression par barres d'Hopkinson

II.1. Introduction

Les essais mécaniques sont utilisés pour étudier et caractériser le comportement des matériaux. Parmi ces essais, on trouve des essais quasi-statiques où la vitesse de déformation est faible à point qu'on peut négliger les forces d'inertie tels qu'aux essais de traction, compression, cisaillement et flexion, etc. D'autre part, il existe également des essais dynamiques à grande vitesse de déformation comme l'essai du canon de Taylor et l'essai des barres d'Hopkinson. Dans ce chapitre, on s'est intéressé à l'essai de compression dynamique par barres d'Hopkinson tout en commençant par un bref historique de la technique. Puis, on a expliqué son principe, les équations de gouvernement et les approches de validité. Tout cela dans le but de se familiariser avec cette technique qui sera utilisée à la partie expérimentale.

II.2. Définition

La technique de la barre d'Hopkinson, appelée aux pays anglosaxons la barre de Kolsky, a été largement utilisée pour étudier le comportement dynamique des matériaux à des taux de déformation élevés ($10^2 - 10^4 \text{ s}^{-1}$) [1]. Grâce à sa technologie d'essai et de mesure, elle est utilisée dans de nombreuses applications (aéronautique, maritime, défense, automobile etc.) et nous permet de réaliser des tests sur plusieurs types d'échantillon de matériaux (aluminium, composite, titane, céramique, mousse, plastique, polymère etc.).

II.3. Historique des barres d'Hopkinson

John Hopkinson a réalisé sa barre de pression en 1872 et ses premiers essais d'impact étaient sur les fils de fer. Le schéma de son appareil est illustré sur la Figure II.1.

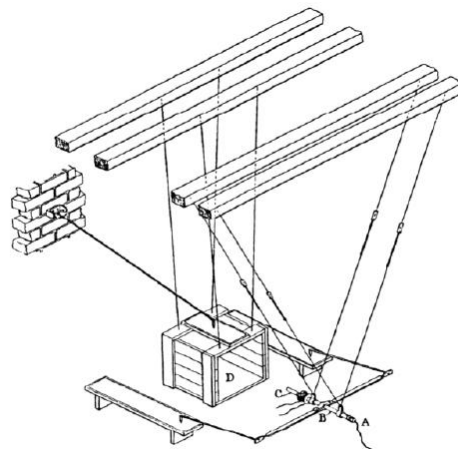


Figure II.1: Schéma de la première barre de pression [2].

Chapitre II : Essai de compression par barres d'Hopkinson

John Hopkinson a essayé de déterminer la réponse dynamique des fils de fer en transférant l'énergie d'un poids tombant dans un fil et en mesurant combien il a été déformé avant la rupture. Il a utilisé une barre (B) suspendue par deux ensembles de fils et alignée avec une boîte (D) également suspendue. La section de la tige courte (C) est placée à l'extrémité de la barre principale et tenue en place par une petite force magnétique. Une balle est alors tirée sur l'extrémité (A) de la longue barre en lui communiquant une onde de pression. L'onde parcourt la tige. Une fois arrivée à la tige courte, elle l'éjecte dans la boîte. Les déplacements de la boîte et de la tige sont mesurés avec un dispositif simple de déplacement. Les appareils de mesure disponibles à l'époque ont limité l'exactitude des résultats des expériences. Seule l'énergie totale transmise à la barre impactée pouvait être mesurée [3], [4].

L'ingénieur britannique Bertram Hopkinson a développé le travail de son père en 1914. Le travail qu'il a exposé est représenté sur la Figure II.2 [5]. L'application initiale de cet appareil de mesure était principalement pour étudier des pressions pendant des événements fortement dynamiques tels que la détonation explosive ou l'impact des balles [4].

Essentiellement, la barre de pression de Hopkinson utilise la propagation des ondes élastiques de contrainte pour prévoir des contraintes et des déformations dans un échantillon. Hopkinson a découvert que les déplacements dans la barre sont directement liés aux contraintes et la longueur de l'onde de contrainte est liée à la durée de l'impact par l'intermédiaire de la vitesse du son dans la barre de pression [4].

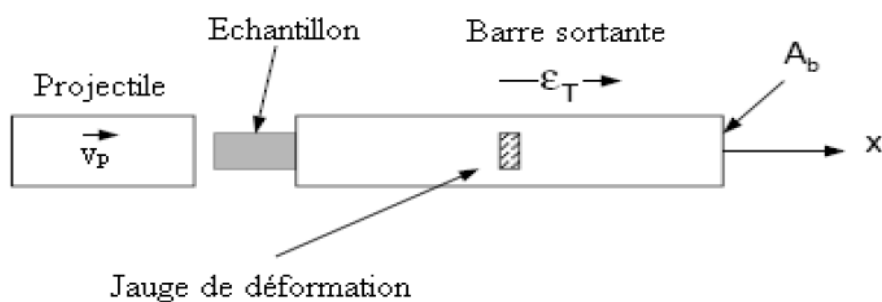


Figure II.2: La barre développée par Bertram Hopkinson (1914) [5].

En 1948, Davies [6] montre qu'il est possible de mesurer la forme temporelle de l'onde engendrée dans une barre instrumentée et soumise à l'impact d'un projectile [4].

Chapitre II : Essai de compression par barres d'Hopkinson

Le montage SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar) est introduit par Kolsky [7] en 1949. C'est la raison pour laquelle le terme « barre d'Hopkinson » est remplacé par le terme « barres de Kolsky » dans de nombreux ouvrages [4].

Kolsky a modifié la barre de pression d'Hopkinson comme représentée sur la Figure 2.3. Il a utilisé cet appareil expérimental de SHPB pour caractériser l'écoulement de déformation des matériaux non fragiles sous un chargement dynamique. Typiquement, le SHPB offre des possibilités d'essai de matériaux aux taux de déformation de l'ordre de 10^2 à 10^4 s^{-1} [4].

Kolsky a découvert que la contrainte et la déformation dans un échantillon peuvent être directement liées aux déplacements des barres incidente et transmise. Contrairement à la barre de pression de Hopkinson, le projectile dans l'appareil SHPB ne percute pas le spécimen directement. Plutôt, c'est la barre incidente qui reçoit l'impact du projectile. Il s'y propage donc une onde de contrainte, d'autant plus intense que la vitesse d'impact est élevée et qui dure d'autant plus longtemps que le projectile est long. Cette onde se réfléchit partiellement sur l'échantillon, une partie le traverse et se transmet dans la barre transmise [4].

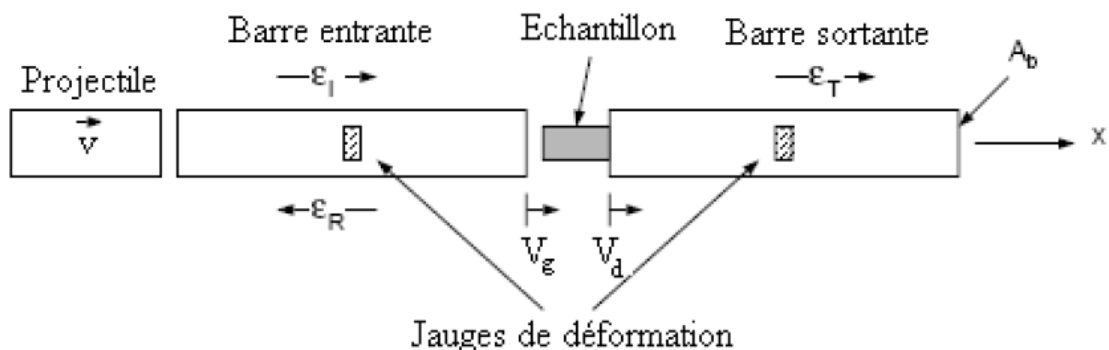


Figure II.3: La barre adaptée par Kolsky (1949) [7].

II.4. Principe de l'essai SHPB

La barre d'Hopkinson se compose d'un projectile, d'une barre incidente et d'une barre transmise. L'échantillon est intercalé entre les deux barres incidente et transmise. Un canon à air comprimé fournit une pression d'impact initiale. Ce dernier lance le projectile pour frapper la barre incidente en générant une onde de compression qui se propage dans la barre incidente jusqu'à l'échantillon, où elle se divise en une partie réfléchie et une partie transmise qui traverse ce dernier vers la barre transmise. Une paire de jauges montées en

Chapitre II : Essai de compression par barres d'Hopkinson

deux demi-points de Wheatstone installée sur chacune des deux barres incidente et transmise pour enregistrer les ondes de contrainte. La durée τ et l'amplitude de l'onde de contrainte incidente (σ_i) peuvent être estimés respectivement comme suit [8]:

$$\tau = \frac{2L}{c_b} \quad (2.1)$$

$$\sigma_i = \frac{\rho_b c_b V_s}{2} \quad (2.2)$$

où : L est la longueur de l'impacteur, c_b est la vitesse de propagation du son dans les barres, ρ_b est la masse volumique des barres et V_s est la vitesse de l'impacteur.

Le principe des barres d'Hopkinson est basé sur la propagation unidimensionnelle d'une onde de contrainte dans une barre élastique. En appliquant la deuxième loi de Newton sur un élément Δx d'une barre de section A_b (Figure II.4) soumise à une force F uniformément distribuée sur sa section, nous pouvons écrire [9]:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \rho_b A_b \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.3)$$

En supposant la barre élastique, l'équation devient :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c_b^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.4)$$

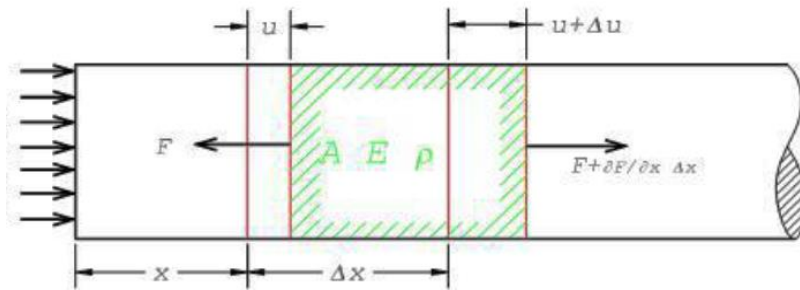


Figure II.4: Equilibre d'un élément unidimensionnel de barre [9] .

Cette expression unidimensionnelle de la propagation des ondes dans une barre fine est appelée aussi équation d'Alembert. Cette théorie permet de remonter des déformations des barres d'Hopkinson à l'obtention des forces et vitesses au niveau des jauges comme suit [9]:

Barre entrante :

$$F_i(t) = A_i E_i (\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)) \quad (2.5)$$

Chapitre II : Essai de compression par barres d'Hopkinson

$$V_i(t) = -c_i(\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t)) \quad (2.6)$$

Barre sortante :

$$F_o(t) = A_o E_o \varepsilon_t(t) \quad (2.7)$$

$$V_o(t) = -c_o \varepsilon_t(t) \quad (2.8)$$

Les indices i et o correspondent respectivement aux barres entrante et sortante. Leurs sections sont dénotées A_i et A_o , les vitesses des ondes dans les barres sont c_i et c_o et leurs modules d'Young sont E_i et E_o .

Les expressions (2.5)-(2.8) permettent de relever les forces et les vitesses à l'emplacement des jauges. Il est nécessaire de les transporter dans l'espace et dans le temps aux faces de l'échantillon avec correction de la dispersion et de l'atténuation.

Avec les forces et des vitesses transportées aux faces de l'éprouvette, il est possible d'exprimer les valeurs technologiques du taux de déformation, de la déformation et de la contrainte par la théorie des trois ondes dans l'éprouvette. Pour une barre entrante et une barre sortante et de même diamètre et matériau, on aura [9]:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{V_i(t) - V_o(t)}{l_s(t)} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon(t) = \int_0^T \dot{\varepsilon}(t) dt \quad (2.10)$$

$$\sigma(t) = \frac{F_i(t) + F_o(t)}{2A_s(t)} \quad (2.11)$$

En supposant l'uniformité des déformations le long de l'éprouvette, on peut exprimer les contraintes et les déformations en fonction des trois ondes [9] :

$$\sigma(t) = \frac{A_b E_b}{2A_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad (2.12)$$

$$\varepsilon(l) = -\frac{c_b}{l_s} \int_0^t [-\varepsilon_i(\tau) + \varepsilon_r(\tau) + \varepsilon_t(\tau)] d\tau \quad (2.13)$$

où A_s , l_s représentent respectivement la surface et la longueur de l'éprouvette.

Ces expressions constituent le cas général ; elles supposent que les forces entrante et sortante ne sont pas en équilibre comme ça peut être le cas pour les matériaux viscoélastiques et fragiles, et sont de ce fait des formules approchées. Au début du

Chapitre II : Essai de compression par barres d'Hopkinson

chargement l'hypothèse de l'équilibre n'est pas correcte car l'état des contraintes dans l'éprouvette n'est pas uniforme, et ceci s'applique pour tous les essais. Le chargement débute sur une face alors que l'autre est encore au repos, on est temporairement dans le régime transitoire. Ce n'est qu'après plusieurs allers-retours des ondes dans l'éprouvette [10] que l'état des contraintes et déformations dans celle-ci peut être considéré comme uniforme. Dans le cas particulier des matériaux fragiles non confinés, le temps de montée de la vitesse de déformation est comparable à la durée de l'essai, de sorte que celui-ci se déroule complètement durant la période transitoire. Des résultats acceptables peuvent être obtenus en utilisant les trois ondes comme dans (2.12) et (2.13); soit la moyenne des forces entrantes et sortantes [11]. Une autre façon plus exacte de traiter le problème résultant du non-équilibre des forces entrante et sortante est l'identification des forces par calcul inverses. Ceci est possible dans le cas des barres de Hopkinson vu que les mesures disponibles (deux forces et deux vitesses) sont redondantes. En considérant comme données les deux vitesses uniquement, et en formulant le comportement du matériau en fonction des paramètres appropriés, il est possible de caler ces paramètres de sorte à identifier les forces calculées aux forces mesurées [12]. L'hypothèse de l'uniformité de contrainte et déformation n'est pas nécessaire dans ce cas.

Donc il est clair que le comportement du matériau ainsi que la longueur de l'éprouvette sont à la source du non-équilibre des forces mesurées. Dans l'hypothèse de l'uniformité des contraintes, on retrouve les formules classiques des deux ondes [7] dans lesquelles l'équilibre des forces (des barres identiques) entraîne l'égalité entre l'onde transmise et la somme de des ondes incidente et réfléchie ($\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t$). La contrainte axiale moyenne peut-être exprimée en fonction de l'onde transmise qui est moins oscillante vu l'effet amortissant que produit l'éprouvette. Cependant, la déformation peut être exprimée en fonction de l'onde réfléchie.

$$\sigma(t) = \frac{A_b E_b}{A_s} \varepsilon_t(t) \quad (2.14)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2c_b}{l_s} \int_0^t \varepsilon_r(\tau) d\tau \quad (2.15)$$

Le taux de déformation $\dot{\varepsilon}_s(t)$ est donné en fonction de la vitesse de propagation de l'onde élastique dans les barres c_b , de l'onde de déformation réfléchie $\varepsilon_r(t)$ et de la longueur du spécimen l_s par :

Chapitre II : Essai de compression par barres d'Hopkinson

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = - \frac{2c_b \varepsilon_r(t)}{l_s} \quad (2.16)$$

$\sigma_s(t)$, $\varepsilon_s(t)$ sont des paramètres technologiques. En revanche, les valeurs vraies de la contrainte et de la déformation sont données selon (Xiangyang Hao et al, 2005) par :

$$\sigma_v(t) = (1 - \varepsilon(t))\sigma(t) \quad (2.17)$$

$$\varepsilon_v(t) = -\ln(1 - \varepsilon(t))$$

II.5. Approches de validité d'un essai de compression par barres d'Hopkinson

Les expressions analytiques permettant de déterminer les propriétés des matériaux sous un chargement à taux de déformation élevée ont été données aux équations (2.12) à (2.17). L'analyse initiale du taux de déformation élevée réalisée par Kolsky [7] reposait sur les approches de base suivantes [8] :

1. Maintenir le projectile, la barre incidente et la barre de transmission à l'état élastique linéaire. Cette approche est satisfaite en utilisant des aciers de haute résistance tel que l'acier maraging qui a une limite d'élasticité est de 2300 MPa. De plus, pour une barre ayant une vitesse de propagation du son C_b , on peut maintenir la contrainte dans les barres en dessous de la limite élastique R_e en contrôlant la vitesse du projectile ($V_s < 2R_e / \rho_b c_b$).
2. La propagation des ondes de contrainte peut être décrite par la théorie 1D. Il est nécessaire de chercher la solution exacte pour les propagations des ondes pour s'assurer de la validité de cette approche [13]. Pour que cette approche tienne bien, les barres élastiques doivent avoir un facteur minceur ($L_b / d_b \geq 20$) [1]. L_b et d_b sont la longueur et le diamètre des barres élastiques. Selon Follansbee [14], il est nécessaire pour des déformation supérieures à 30% que les barres aient un facteur minceur de 100 ou plus.
3. Les interfaces barre entrante-échantillon et barre sortante-échantillon restent planes à tout moment. Cette approche est vraie tant que le diamètre de l'échantillon est égal à celui des barres ou légèrement inférieur à celui des barres, et dans le cas d'échantillons acoustiquement doux en comparaison avec le matériau des barres.

Chapitre II : Essai de compression par barres d'Hopkinson

- Un échantillon acoustiquement doux possède une faible impédance acoustique ($Z = \rho_s c_b$) où ρ_s est la masse volumique de l'échantillon.
4. Les effets d'inertie et de frottement dans l'échantillon sont négligeables. Gray [13] a proposé que les effets de frottement et d'inerties longitudinale et radiale peuvent être atténués en minimisant la différence de section entre les barres et l'échantillon ($d_s \approx 0.8 d_b$); et choisir $0.5 < l_s / d_s < 1$. Pour les échantillons de section non circulaire, Tekalur and Sen [15] propose un taux minceur valide pour toute section transversale. Ce taux donne un frottement interfacial correctement réduit pour $1.4 < l_s / \sqrt{(J/A_s)} < 2.8$, où J est le moment d'inertie et A_s la section du spécimen.
 5. L'équilibre des contraintes dans l'échantillon et la constance de la vitesse de déformation [13]. L'équilibre et l'uniformité axiale de la contrainte dans un échantillon est évalué en comparant les contraintes relevées des approches d'analyse 1 onde et 2 ondes [13] ou on compare les forces appliquées par les barres sur les deux faces de l'échantillon. L'équilibre des contraintes est atteint après une période initiale après quelques réverbérations de l'onde de contrainte (3-4, exactement π) [16]. Cependant, si l'échantillon subit un amorçage et progression de l'endommagement, l'atténuation des ondes de contrainte se produira dans l'échantillon au cours du test et l'hypothèse de l'équilibre de contrainte ne sera pas valide [17]. Une vitesse de déformation uniforme le long de l'expérience peut être obtenue en utilisant la technique du façonneur d'onde.
 6. L'échantillon n'est pas compressible. Gray [13] a noté l'importance de cette exigence pour tous les types des essais des barres Hopkinson utilisant les approches détaillées de l'onde unidimensionnelle est que la contrainte réelle dans l'échantillon SHPB ne peut pas être extraite pour les matériaux ayant un volume non conservé. La section instantanée est déduite en supposant la validité de l'hypothèse de la constance du volume de l'échantillon, cela signifie l'existence d'une relation fixe entre la section transversale de l'échantillon et sa longueur.

II.6. Conclusion

Ce chapitre est dédié à des généralités sur les barres d'Hopkinson, à un bref historique de la technique SHPB, au principe de fonctionnement, aux équations de calcul, et aux approches de validité à satisfaire. Il a pour objectif de mener correctement nos campagnes d'essais de compression par barres d'Hopkinson et dépouiller leurs résultats.

II.7. Références bibliographiques

- [1] W. W. Chen et B. Song, Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing and applications. Springer Science & Business Media, 2010.
- [2] C. Salisbury, « Spectral analysis of wave propagation through a polymeric Hopkinson bar », Master's PhD, University of Waterloo, 2001.
- [3] L. Gueraiche, « Mise point du dispositif à barre de pression d'Hopkinson divisée (BPHD) », Mémoire de Magister, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2008.
- [4] L. Gueraiche, Dispositif de compression à barre d'Hopkinson divisée-Conception, acquisition des signaux et dépouillement. Éditions Universitaires Européennes, 2017.
- [5] B. Hopkinson, « X. A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets », *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Contain. Pap. Math. Phys. Character*, vol. 213, n° 497-508, p. 437–456, 1914.
- [6] R. M. Davies, « A critical study of the Hopkinson pressure bar », *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci.*, vol. 240, n° 821, p. 375–457, 1948.
- [7] H. Kolsky, « An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading », *Proc. Phys. Soc. Sect. B*, vol. 62, n° 11, p. 676, 1949.
- [8] L. Gueraiche, M. Tarfaoui, H. Osmani, et A. Aboulghit El Malki, « A practical note for SHPB test with new algorithms for delimiting pulses », *Compos. Struct.*, vol. 126, p. 145–158, 2015.
- [9] K. Safa, G. Gary, et P. Forquin, « Mise au point d'un essai de compaction dynamique et statique sur matériaux fragiles », Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, 2009.
- [10] L. D. Bertholf et C. H. Karnes, « Two-dimensional analysis of the split Hopkinson pressure bar system », *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 23, n° 1, p. 1–19, 1975.
- [11] H. Zhao et G. Gary, « A three-dimensional analytical solution of the longitudinal wave propagation in an infinite linear viscoelastic cylindrical bar. Application to experimental techniques », *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 43, n° 8, p. 1335–1348, 1995.
- [12] L. Rota, « Application de méthodes inverses au dépouillement de l'essai aux barres de Hopkinson. », Thèse de doctorat, 1997.

Chapitre II : Essai de compression par barres d'Hopkinson

[13]G. T. GRAY III, « Classic split Hopkinson pressure bar testing », *ASM Handb.*, vol. 8, p. 462–476, 2000.

[14]P. S. Follansbee, « The hopkinson bar », *Met. Handb.*, vol. 8, n° 9, p. 198–217, 1985.

[15]S. A. Tekalur et O. Sen, « Effect of specimen size in the Kolsky bar », *Procedia Eng.*, vol. 10, p. 2663–2671, 2011.

[16]E. D. H. Davies et S. C. Hunter, « The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar », *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 11, n° 3, p. 155–179, 1963.

[17]N. K. Naik, K. S. Pandya, J. R. Pothnis, et T. A. Gelu, « Revisiting Kolsky bar data evaluation method », *Compos. Struct.*, vol. 111, p. 446–452, 2014.

Chapitre III

Techniques expérimentales

Chapitre III : Techniques expérimentales

III.1. Introduction

Dans ce chapitre des techniques expérimentales, on décrit les constituants de notre composite ainsi que le procédé d'obtention de nos échantillons qui est le moulage par infusion. Les échantillons sont calcinés dans un four pour déterminer les fractions massiques et volumiques des fibres de verre E et de s'assurer de leurs dispositions. Enfin, on donne les paramètres des échantillons testés en compression par barres d'Hopkinson afin de les introduire par la suite au programme de dépouillement.

III.2. Matériau et procédé d'élaboration

Le stratifié à plis croisés $(90^{\circ}/0^{\circ})_{20}$ est composé d'une matrice époxy renforcée de fibres de verre 2400 Tex E. La résine du produit Axson a été préparée en mélangeant le prépolymère EPOLAM avec le durcisseur EPOLAM 2020 et l'accélérateur 2020. Le renfort était un tissu à armure toile avec 90% de fils de chaîne et 10% de fils de trame. Les panneaux à plis croisés $(90^{\circ}/0^{\circ})_{20}$ ont été fabriqués par infusion. Les panneaux carrés de $500 \times 500 \text{ mm}^2$ ont été découpés en échantillons cubiques de $13 \times 13 \times 13 \text{ mm}^3$; Figure III.1



(a) Processus d'infusion



(b) Echantillons

Figure III.1: Panneaux et échantillons fabriqués $(90^{\circ}/0^{\circ})_{20}$ en verre E/époxy.

III.3. Calcination des éprouvettes

On entend par le mot calcination le chauffage (combustion) au four d'un composite jusqu'à une certaine température (degré de décomposition) pour supprimer complètement ou partiellement certains de ces composants. En d'autres termes, la

Chapitre III : Techniques expérimentales

calcination est une opération qui consiste à traiter au feu une substance jusqu'à ce qu'elle perde les matières décomposables ou volatiles qu'elle contienne.

III.3.2. Cycle de calcination

La calcination de notre échantillon $(90^{\circ}/0^{\circ})_{20}$ en verre E/époxy a été faite au four du laboratoire de construction mécanique de l'université de Jijel. Elle s'est déroulée comme suit :

✓ Avant de faire la calcination, on pèse l'échantillon mis dans un creuset à l'aide d'une balance de précision Kern ; Figure III.2.

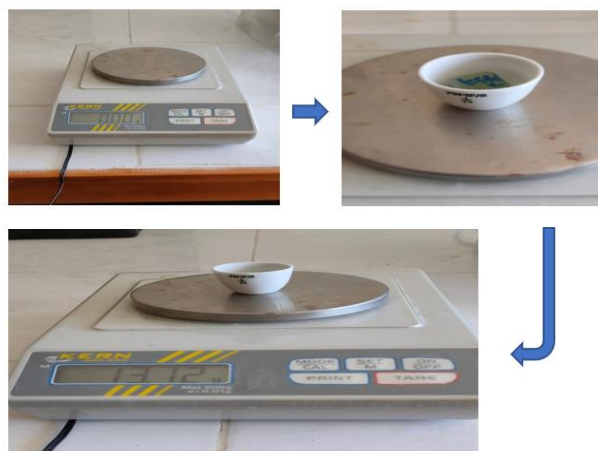


Figure III.2: Pesée de l'échantillon mis en creuset.

✓ On met le creuset contenant l'échantillon au four et on le ferme bien tel que le montre les images de la Figure III.3.

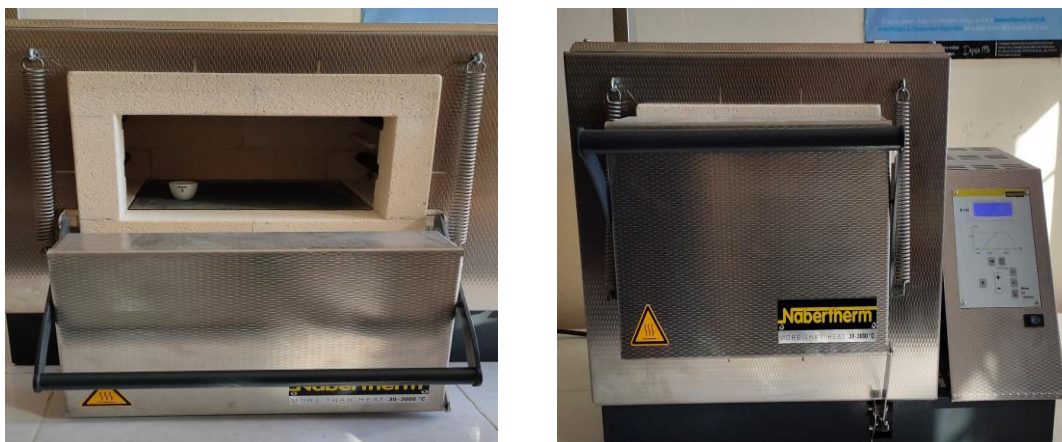


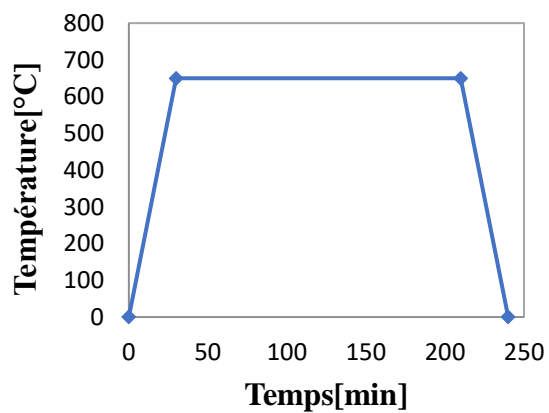
Figure III.3: Mise en place de l'échantillon en creuset et fermeture du four Nabertherm du laboratoire de construction mécanique-Jijel.

Chapitre III : Techniques expérimentales

✓ On assure le bon réglage du cycle de calcination sur le four afin qu'on calcine la résine époxy sans altérer les plis du renfort en fibres de verre E ; Figure III.4. Les paramètres du cycle de calcination sont donnés à la Figure III.5.



Figure III.4: Réglage du cycle de calcination.



Temps [min]	Température [°C]
0	0
30	650
210	650
240	0

Figure III.5: Cycle de calcination du composite croisé $(90^{\circ}/0^{\circ})_{20}$ en verre E/époxy.

Chapitre III : Techniques expérimentales

✓ Après la fusion et la disparition de la résine époxy, on a obtenu les plis des renforts intacts, composés de 40 plis disposés en alternance entre 90° et 0° comme le montre la Figure III.6.

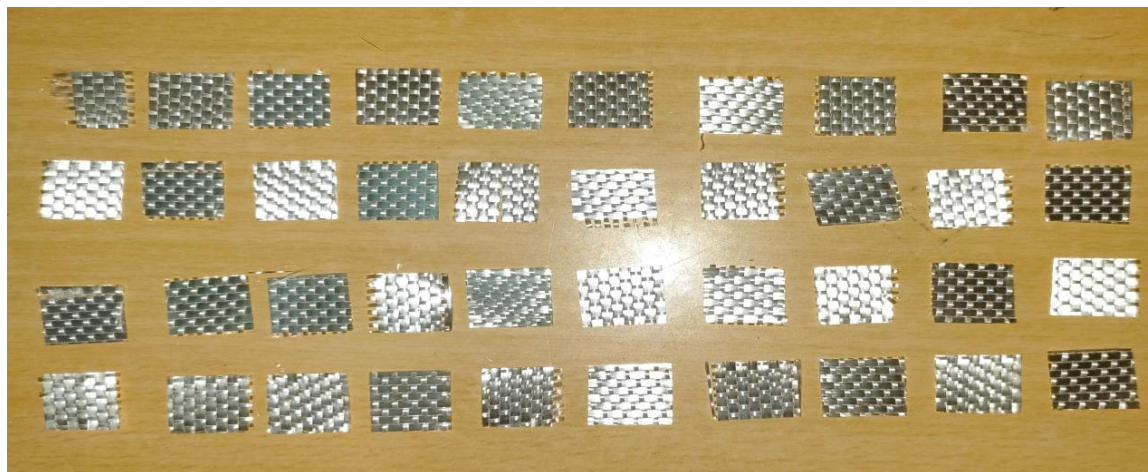


Figure III.6: Disposition des 40 plis croisés au sein du stratifié $(90^\circ/0^\circ)_{20}$ verre E/époxy de droite en gauche et de haut en bas.

III.3.3. Fraction massique des fibres

La détermination de la fraction massique des fibres a été faite en conformité à la norme ASTM D 3171 – 99. En fonction du poids du creuset à vide (W_1), du poids du creuset avec l'échantillon avant calcination (W_2), et après calcination (W_3), la fraction massique des fibres (M_f) est calculée par la relation :

$$M_f(\%) = \frac{W_3 - W_1}{W_2 - W_1} \times 100 \quad (3.1)$$

W_1 (g)	W_2 (g)	W_3 (g)	M_f (%)	Désignation	N° plis
8,8	13,12	11,92	72,22	$[90^\circ/0^\circ]_{20}$	40

Tableau III. 1 : Détermination de la fraction massique des fibres.

D'après le Tableau III. 1, la fraction massique de notre stratifié croisés en verre E/époxy $[90^\circ/0^\circ]_{20}$ est égal à : 72,22%.

Chapitre III : Techniques expérimentales

III.3.4. Fraction volumique des fibres (ASTM D2584)

La détermination de la fraction volumique des fibres a été faite en conformité à la norme ASTM D2584. En fonction du poids des fibres (W_f), du poids de la matrice (W_m), de la masse volumique des fibres de verre E ($\rho_f = 2,5 T/m^3$), de la masse volumique de la matrice époxy ($\rho_m = 1,1 T/m^3$), la fraction volumique des fibres (V_f) est calculée par la relation :

$$V_f = 100 \frac{\rho_m W_f}{\rho_f W_m + \rho_m W_f} \quad (3.2)$$

Après calcul, on a eu : $V_f = 53,36\%$

N.B : Il est aussi possible d'utiliser l'expression donnée dans ASTM D 3171 - 99 pour calculer V_f comme suit :

$$V_f = \left(\frac{W_f}{W_c} \right) \times 100 \times \frac{\rho_c}{\rho_f} \quad (3.3)$$

où : ρ_c est la masse volumique du composite en (g/ml), ρ_f est la masse volumique des fibres en (g/ml) et W_c est le poids de l'échantillon (composite).

III.4. Essais de compression dynamique par barres d'Hopkinson

La célèbre barre d'Hopkinson (SHPB), appelée aussi barre de Kolsky, est généralement utilisée pour étudier le comportement des matériaux à vitesse de déformation élevée dans la plage de 10^2 à $10^4 s^{-1}$. L'appareil SHPB de l'IRDL utilisé dans cette étude était composé d'un impacteur (0,4 m) à bout arrondi, d'une barre incidente (1,985 m) et d'une barre transmise (1,845 m) comme le montre la Figure III.7. Les trois barres de 20 mm de diamètre étaient en acier maraging. Dans les essais de compression, un échantillon cubique en verre E/époxy de 13 mm d'épaisseur est intercalé entre les barres incidente et transmise ; Figure III.8. Le projectile est propulsé avec une vitesse d'impact initiale qui est fonction de la pression canon à air. L'impact du projectile sur le bord libre de la barre incidente (BI) génère une onde de contrainte de compression qui se propage à travers BI vers l'interface barre incidente/échantillon. En raison de changement de l'impédance acoustique, une partie de l'onde de contrainte est réfléchiée dans la barre incidente, et une autre traverse l'échantillon vers la barre transmise. Une paire de deux demi-points de Wheatstone situés respectivement à $\Delta x_1 = 0,9635 m$ et $\Delta x_2 = 0,959 m$

Chapitre III : Techniques expérimentales

des interfaces échantillon/barre ont été utilisés pour enregistrer les ondes de déformation ; Figure III.8. Les tensions des jauges de contrainte sont converties en déformation incidente ε_i , réfléchiée ε_r et transmise ε_t en utilisant l'équation (3.4).

$$\varepsilon(t) = \frac{2 \cdot \Delta Em(t)}{k \cdot (U_0 - 2\Delta Em(t))} = \frac{1}{\frac{k \cdot U_0}{2\Delta Em(t)} - k} \quad (3.4)$$

Où : $\varepsilon(t)$, $\Delta Em(t)$, k et U_0 représentent respectivement la déformation, la tension de sortie du demi-pont, le facteur de la jauge ($k = k_{inc} = k_{trans} = 2.105$) et la tension d'alimentation du demi-pont. Les tensions des jauges ont été enregistrées à l'aide de la baie d'acquisition Nicolet Odyssey 3.26 à une fréquence d'échantillonnage de 1 MHz.

Après l'acquisition des signaux des signaux de contrainte, on fait leur le transport de la position des ponts aux interface avec correction de la dispersion par la transformée de Fourier rapide (FFT).



Figure III.7: Barre d'Hopkinson de compression

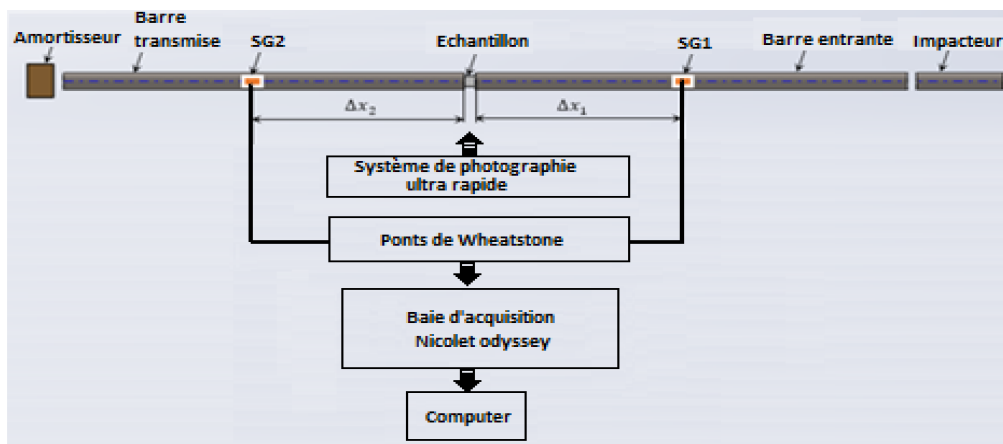


Figure III.8: Schéma de la barre de compression d'Hopkinson.

Chapitre III : Techniques expérimentales

III.5. Paramètres des essais sur éprouvettes croisées (90°/0°)₂₀ en verre E/époxy testées dans le plan

Les Paramètres des essais de compression par barres d'Hopkinson sur les éprouvettes (90°/0°)₂₀ en verre E/époxy testées dans le plan sont récapitulés au Tableau III. 2. Où : P est la pression d'essai, V_s est la vitesse d'impact et U_0 est la tension d'alimentation du pont. E, H et L désignent respectivement l'épaisseur, la hauteur et la largeur de l'échantillon.

$P[bar]$	N°	$V_s[m/s]$	$E \times H \times L (mm^3)$	$U_0[V]$
1.3	1	3.54	13.54x13.03x13.50	12.412
	2	3.63	13.44x13.05x13.59	12.412
	3	3.20	12.97x13.05x12.77	12.412
	4	3.11	12.94x13.04x12.81	12.412
1.5	1	5.30	13.18x12.97x13.38	12.412
	2	5.21	13.37x12.89x12.85	12.411
	3	5.27	12.76x12.94x12.97	12.411
	4	4.94	13.43x13.14x13.24	12.411
1.6	1	6.04	12.64x13.16x13.08	12.410
	2	5.98	12.94x13.14x13.07	12.409
	3	6.08	12.75x13.15x13.04	12.409
	4	6.21	13.11x13.17x12.77	12.409
2	1	9.08	12.79x13.19x13.08	12.408
	2	8.66	13.54x13.04x13.38	12.408
	3	8.94	12.98x13.05x12.83	12.407
	4	8.77	13.38x13.01x12.99	12.407

Tableau III. 2: Paramètres des essais de compression dynamique par barres d'Hopkinson sur les éprouvettes croisées (90°/0°)₂₀ en verre E/époxy.

Chapitre IV

Résultats expérimentaux et discussion

Chapitre IV : Résultats expérimentaux et discussion

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, on va discuter les résultats expérimentaux de essais de compression dynamique des stratifiés composites croisés $(90^\circ/0^\circ)_{20}$ en verre E/époxy testés à l'aide de la barre de compression d'Hopkinson dans la plage des vitesses de déformation 200-590 s^{-1} . Pour cela, on commence par donner un exemple de signaux typiques enregistrés par les demi-points de jauges sur la barre d'Hopkinson. Puis, on passe à la détermination des paramètres locaux (déformations, vitesses et forces). Ensuite, on montre la répétabilité de nos résultats via des exemples. Le comportement dynamique de nos résultats est discuté via les courbes contrainte-déformation et taux de déformation-temps pour les pressions d'impact de notre étude (taux de déformation). Enfin, on a met en évidence l'effet de la vitesse de déformation sur la variation des paramètres dynamiques de notre stratifié.

IV.2. Signaux typiques des jauges

Figure IV.1 montre un exemple de signaux typiques tension-temps enregistrées par les demi-points de jauges montés respectivement sur la barre incidente et la barre transmise pour un essai fait à une pression de 1.3 bar. Le signal enregistré par le pont de la barre incidente comporte un pulse incident et un pulse réfléchi. Le pulse incident est négatif car il s'agit d'une onde de compression générée par l'impacteur.

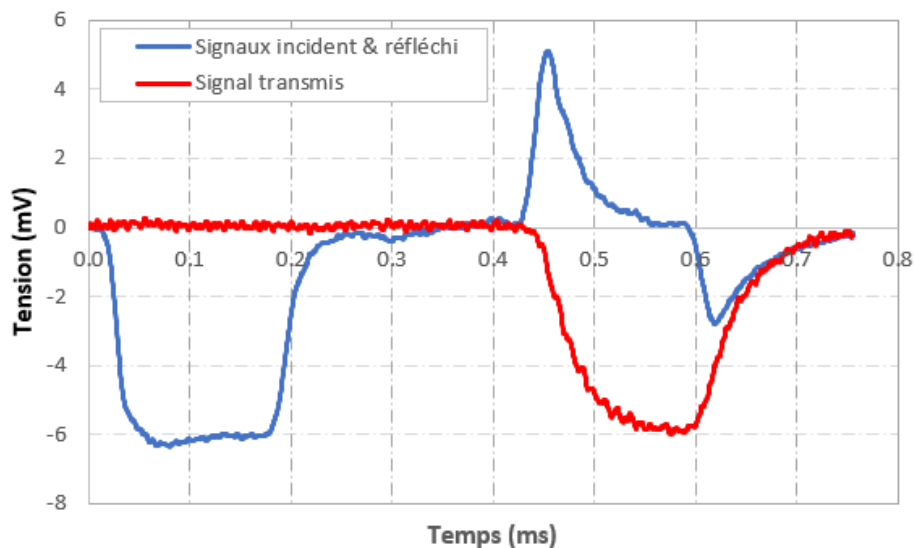


Figure IV.1 : Signaux typiques des jauges à P =1.3 bar.

Chapitre IV : Résultats expérimentaux et discussion

Pour le pulse réfléchi, il démarre par une partie positive qui correspond à la réflexion de l'onde incidente à l'interface suite aux changements de l'impédance acoustique et une partie négative qui correspond au retour élastique du fait que l'échantillon n'est rompu. Le pulse transmis est négatif car il s'agit de la partie de l'onde incidente qui traverse l'échantillon vers la barre transmise.

IV.3. Paramètres locaux des essais

On désigne par paramètres locaux les déformations aux niveaux des ponts d'extensométrie, les vitesses des bouts des barres incidente et transmise en contact avec l'échantillon et les forces appliquées sur les faces de l'échantillon. La Figure IV.2 représente les courbes déformation-temps des essais de compression par barres d'Hopkinson sur les éprouvettes $(90^\circ/0^\circ)_{20}$ en verre E/époxy aux pressions 1.3, 1.5, 1.6 et 2 bars respectivement.

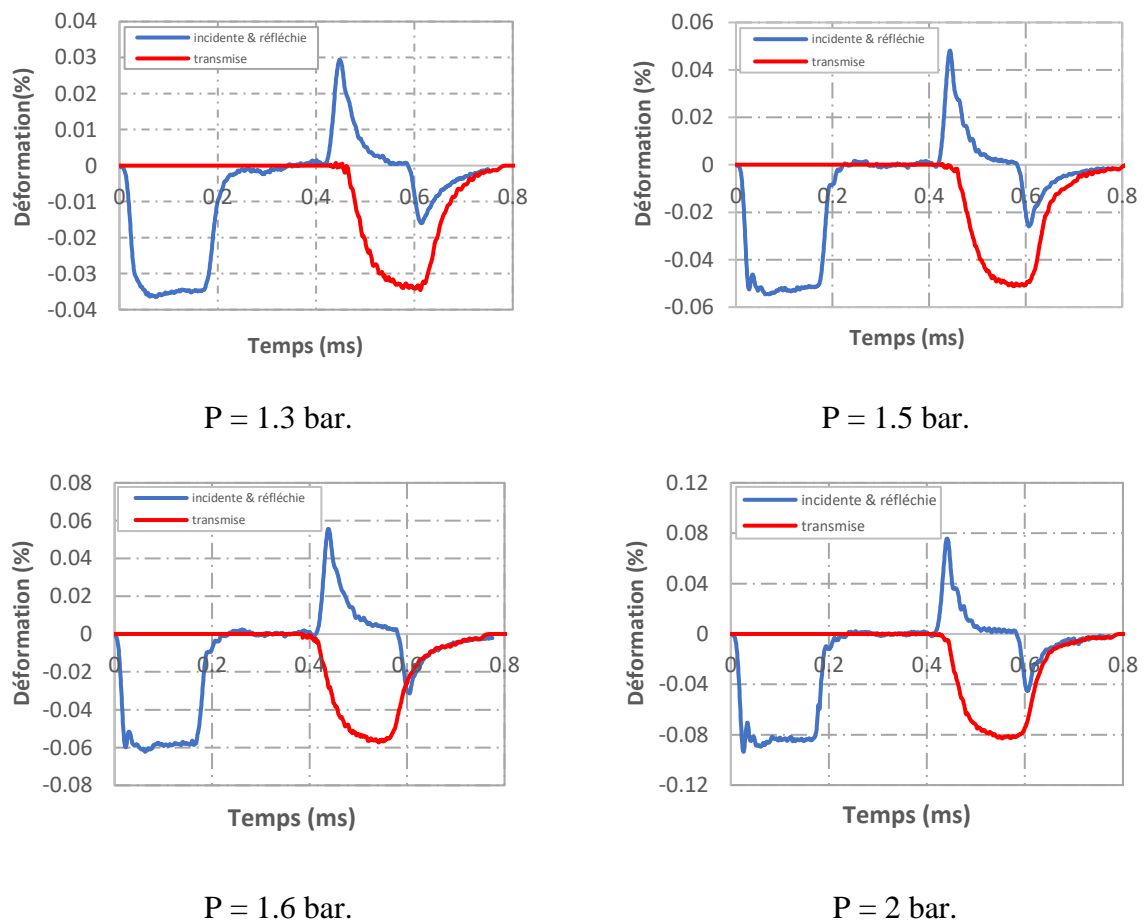


Figure IV.2 : Courbes déformation-temps des essais de compression dans le plan par barre d'Hopkinson sur les éprouvettes $(90^\circ/0^\circ)_{20}$ en verre E/époxy sous différentes pressions.

Chapitre IV : Résultats expérimentaux et discussion

Ces courbes déformation-temps sont obtenues par conversion des signaux tension-temps des ponts de jauges en utilisant l'équation (3.4). Le dépouillement des résultats a été fait par un programme de l'IRDL développé par Dr. Gueraiche Larbi. Pour chaque pression, on a superposé les signaux déformation-temps des deux ponts sur le même graphique. Les mêmes types de déformation ont grosso-modo les mêmes allures car il s'agit bien d'essais non endommageant. L'amplitude maximale des pulses augmente avec l'augmentation de la pression d'impact.

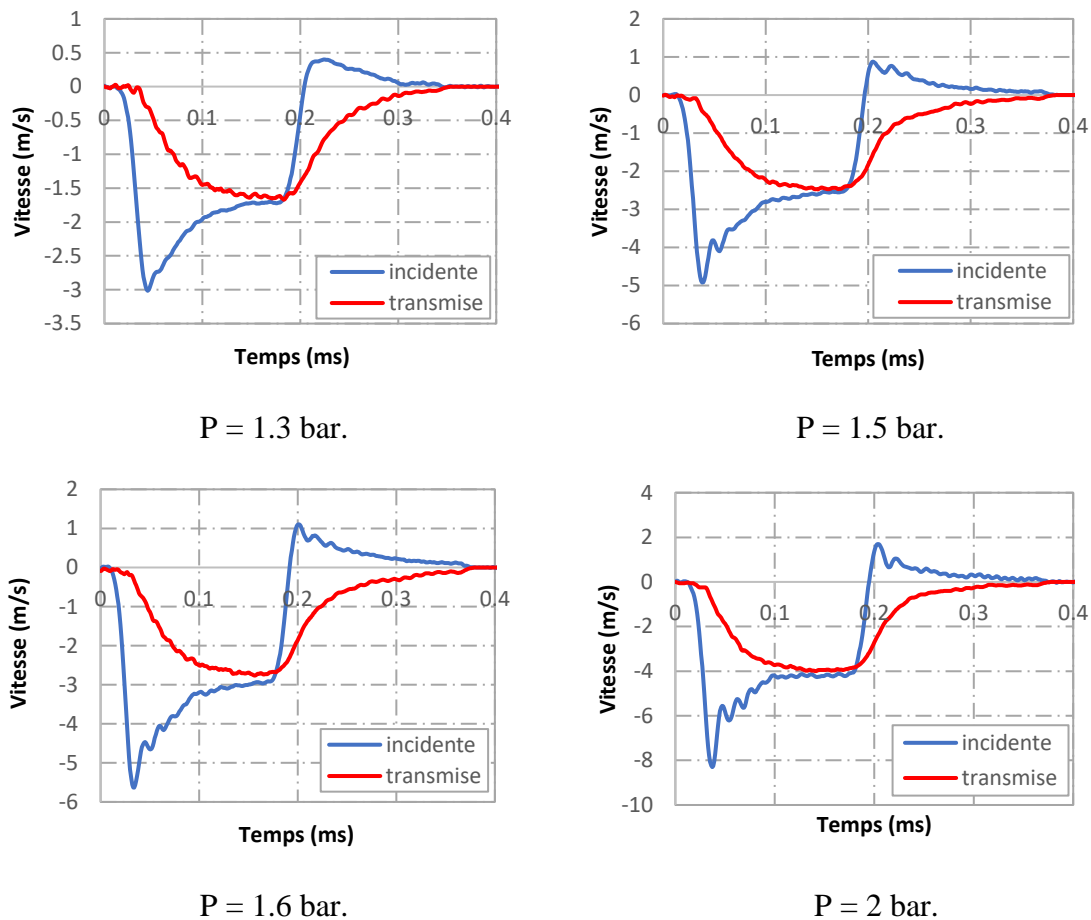


Figure IV.3 : Courbes vitesse-temps des essais de compression dans le plan par barre d'Hopkinson sur les éprouvettes $(90^{\circ}/0^{\circ})_{20}$ en verre E/époxy sous différentes pressions.

La Figure IV.3 représente les courbes des vitesses incidente et transmise pour les essais de compression par barres d'Hopkinson sur les éprouvettes $(90^{\circ}/0^{\circ})_{20}$ en verre E/époxy aux pressions 1.3, 1.5, 1.6 et 2 bars respectivement. Les courbes de vitesse incidente-temps et vitesse transmise-temps sont déterminées par le programme de dépouillement Maple en utilisant les équations (2.6) et (2.8) sur les deux faces de

Chapitre IV : Résultats expérimentaux et discussion

l'échantillon. Pour chaque pression, on a superposé les courbes de la vitesse incidente-temps et la vitesse transmis-temps sur le même graphique. Les mêmes types de vitesses ont grosso-modo les mêmes allures. L'amplitude maximale des vitesses augmente avec l'augmentation de la pression d'impact. Cependant, l'allure de la vitesse incidente est différente de cette transmise car l'échantillon du côté de la barre incidente subit une sollicitation à vitesse élevée (la vitesse du bout de la barre incidente) avec un temps de montée aigu au début cependant du côté de la barre transmise la vitesse est moins élevée vu l'amortissement de l'onde de choc par l'échantillon.

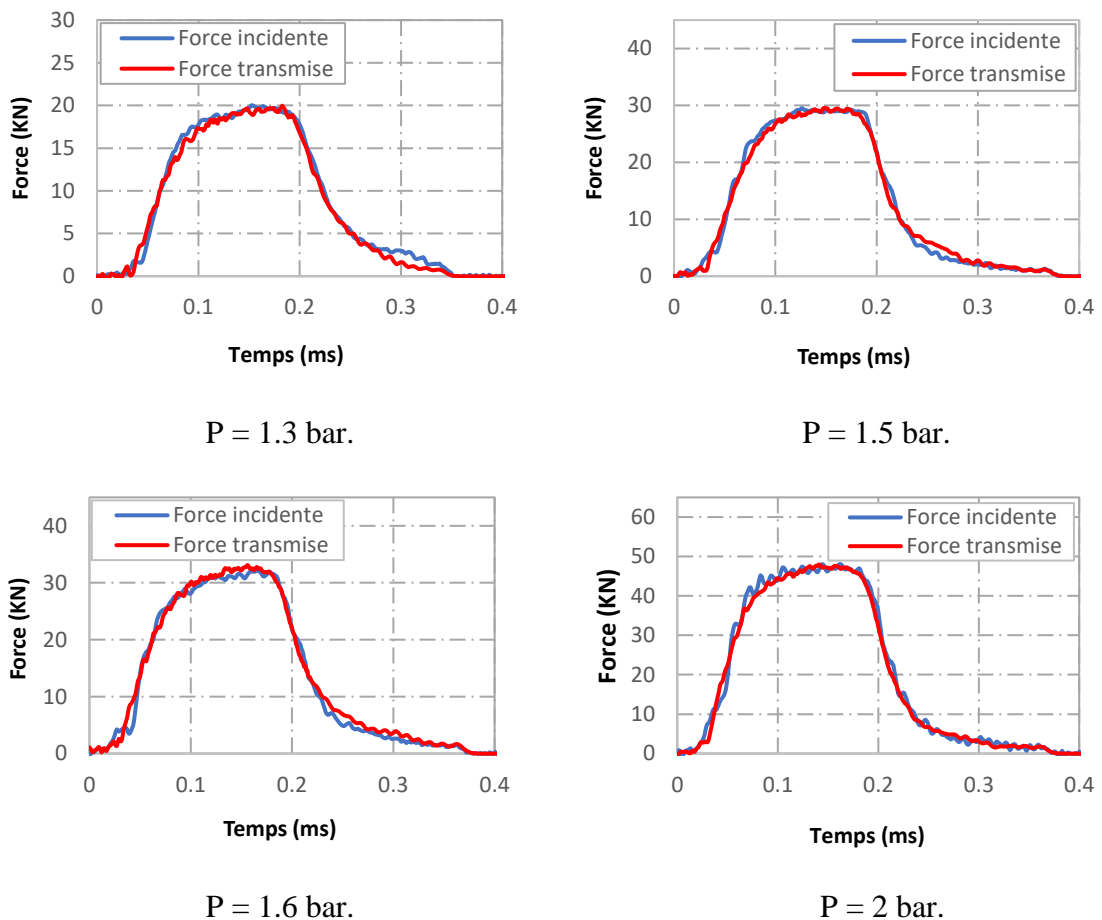


Figure IV.4 : Courbes force-temps des essais de compression dans le plan par barre d'Hopkinson sur les éprouvettes $(90^{\circ}/0^{\circ})_{20}$ en verre E/époxy sous différentes pressions.

La Figure IV.4 représente les courbes des forces incidente et transmise pour les essais de compression par barres d'Hopkinson sur les éprouvettes $(90^{\circ}/0^{\circ})_{20}$ en verre E/époxy testées sous les pressions 1.3, 1.5, 1.6 et 2 bars respectivement. Les courbes de force incidente-temps et force transmise-temps sont déterminées à l'aide du programme de dépouillement Maple de l'IRDL en utilisant les équations (2.5) et (2.7). Pour chaque

Chapitre IV : Résultats expérimentaux et discussion

pression, on a superposé les courbes de la force incidente-temps et la force transmise-temps sur le même graphique. Les graphiques de même type de force ont grosso-modo les mêmes allures. L'amplitude maximale des forces augmente avec l'augmentation de la pression d'impact. La comparaison des forces incidente et transmise montre qu'il y avait un équilibre de forces pendant les essais.

IV.4. Reproductibilité des courbes contrainte-déformation

Afin d'assurer la reproductibilité des résultats, on a fait au moins trois essais à chaque pression d'essai. Les courbes contrainte-déformation des essais faits aux mêmes pressions (1.3 bar, 1.5 bar, 1.6 bar et 2 bar) sont superposées sur le même graphique. Les courbes sont générées après dépouillement des résultats par le programme Maple de l'IRDL.

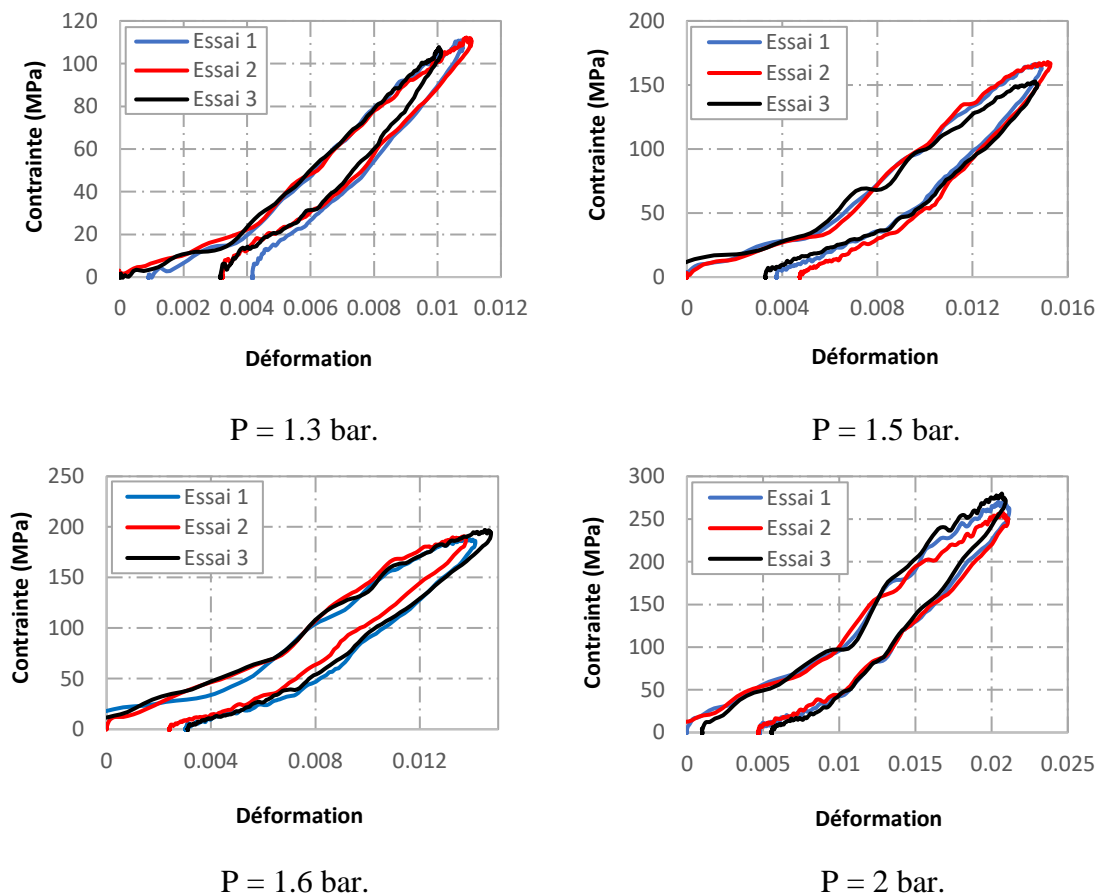


Figure IV.5 : Reproductibilité des courbes contrainte-déformation des éprouvettes $(90^{\circ}/0^{\circ})_{20}$ en verre E/époxy pour les essais de compression dans le plan par barre d'Hopkinson sous les pressions : 1.3, 1.5, 1.6 et 2 bar.

Chapitre IV : Résultats expérimentaux et discussion

La Figure IV.5 montre la bonne répétabilité des résultats pour les pressions d'étude. Pour avoir une meilleure visibilité de la répétabilité des résultats, l'écart-type est calculé pour chaque lot de trois essais (chaque pression). Les paramètres dynamiques ainsi que les moyennes et écarts type par lots de pressions sont récapitulés au Tableau IV.1. Sachant que V_s est la vitesse de l'impacteur, $\dot{\epsilon}$ est le taux de déformation relevé de la valeur du premier pic des courbes taux de déformation-temps, E_c est le module d'Young ou le module de compression, σ_{max} est la contrainte maximale, et $\epsilon_{\sigma_{max}}$ est la déformation qui correspond à la contrainte maximale.

A noter qu'une incertitude (écart-type) de jusqu'à 10 % par rapport à la moyenne est acceptable pour les composites vu l'incertitude sur l'angle de découpe des échantillons, les petites fluctuations en vitesses d'impact dues au frottement du projectile avec l'alésage du canon malgré qu'on fût aux mêmes pressions, et l'hétérogénéité de la structure des composites.

P (bar)		V_s (m/s)	$\dot{\epsilon}(s^{-1})$	$E_c(GPa)$	$\sigma_{max}(MPa)$	$\epsilon_{\sigma_{max}}(\%)$
1.3	Essai 1	3.5	201	11.06	110.94	0.99
	Essai 2	3.6	222	9.93	112.19	1.09
	Essai 3	3.2	202	10.85	107.75	1.01
	Moyenne	3.5	208	10.61	110.29	1.03
	Ecart type	0.2	12	0.60	2.29	0.05
1.5	Essai 1	5.3	343	10.89	166.49	1.47
	Essai 2	5.3	354	11.16	167.94	1.52
	Essai 3	4.9	326	9.95	152.77	1.58
	Moyenne	5.2	341.0	10.67	162.40	1.52
	Ecart type	0.2	14.1	0.63	8.37	0.06
1.6	Essai 1	6.0	413	11.52	187.88	1.61
	Essai 2	6.1	378	14.22	190.85	1.37
	Essai 3	6.2	392	13.03	197.01	1.52
	Moyenne	6.1	394.3	12.92	191.91	1.50
	Ecart type	0.1	17.6	1.35	4.66	0.12
2	Essai 1	9.1	587	13.06	270.52	2.08
	Essai 2	8.7	540	12.07	257.32	2.11
	Essai 3	8.9	573	14.38	279.89	1.97
	Moyenne	8.9	566.7	13.17	269.24	2.05
	Ecart type	0.2	24.1	1.16	11.34	0.07

Tableau IV.1 : Paramètres des essais de compression dynamique dans le plan par barre d'Hopkinson des éprouvettes croisées $(90^\circ/0^\circ)_{20}$ en verre E/époxy.

IV.5. Comportement dynamique des stratifiés croisés

Après vérification de la répétabilité des résultats des courbes contrainte-déformation, on a choisi un essai par pression (taux de déformation) parmi les essais les plus répétables. Les essais choisis sont surlignés en vert au Tableau IV.1.

Les variations des courbes contrainte-déformation pour les éprouvettes $(90^\circ/0^\circ)_{20}$ en verre E/époxy testées dans le plan, dans la direction 0° des fibres, sous les taux de déformation 202 , 354, 392 et 587 s^{-1} correspondant respectivement aux pressions d'impact 1,3, 1,5, 1,6 et 2 bars sont représentées sur la Figure IV.6.

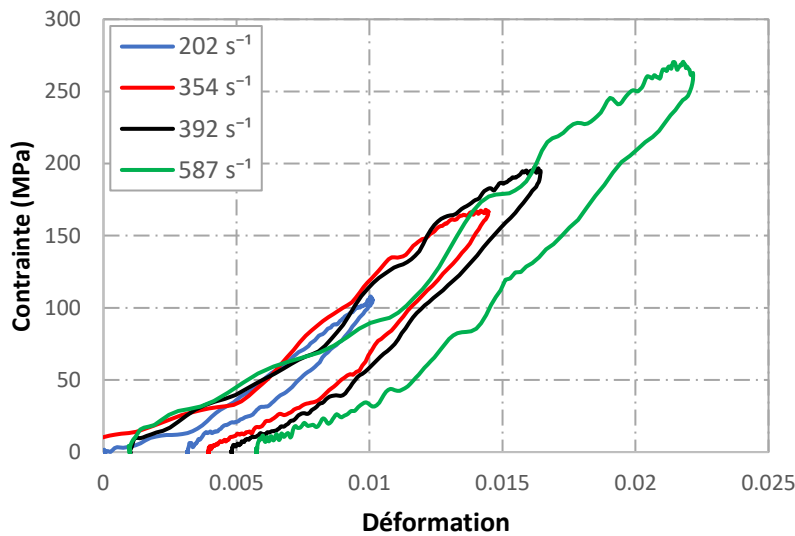


Figure IV.6 : Courbes contrainte-déformation des éprouvettes $(90^\circ/0^\circ)_{20}$ en verre E/époxy sous différents taux de déformation.

La valeur du premier pic de la vitesse de déformation est considérée pour l'analyse des résultats expérimentaux. Les essais expérimentaux réalisés sont des essais non endommageant menés à faible vitesse de d'impact qui ont montré essentiellement une réponse élastique sans endommagement macroscopique. Le comportement sous compression dynamique des stratifiés $(90^\circ/0^\circ)_{20}$ en verre E/ époxy dépendait du taux de déformation. La réponse contrainte-déformation était presque la même pendant la déformation élastique linéaire, tandis que la contrainte maximale et la déformation qui correspond à la contrainte maximale augmentaient avec l'augmentation de la vitesse de déformation. Des tests intacts ont montré une déformation permanente à la fin de l'essai qui augmentait avec l'augmentation de la vitesse de déformation. Cette déformation permanente correspond au degré de microfissuration de la structure.

Chapitre IV : Résultats expérimentaux et discussion

Les courbes typiques de la vitesse de déformation en fonction du temps des stratifiés $(90^\circ/0^\circ)_{20}$ en verre E/ époxy sont illustrées à la Figure IV.7.

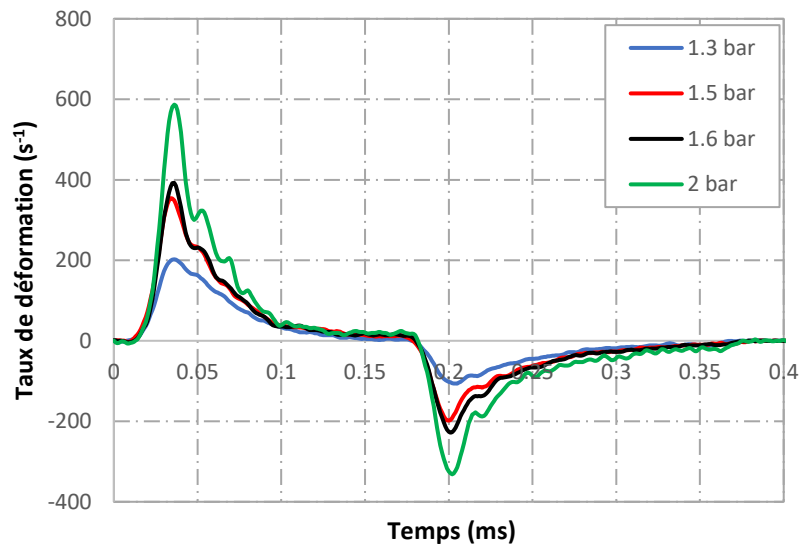


Figure IV.7 : Courbes taux de déformation-temps des éprouvettes $(90^\circ/0^\circ)_{20}$ en verre E/époxy sous différentes pressions d'impact.

L'évolution de la vitesse de déformation était sensible à la pression de propulsion de l'impacteur P dans la chambre du canon à air comprimé. Premièrement, le taux de déformation a augmenté rapidement pour les tests non-endommageant réalisés sous 1.3, 1.5, 1.6 et 2 bar, puis a diminué et est resté assez constant. La chute du taux de déformation a atteint des valeurs négatives qui correspondent au retour élastique dans l'échantillon.

Une caméra ultra-rapide Photron Fastcam est utilisée en corrélation avec l'essai de compression par barres d'Hopkinson pour suivre les séquences de sollicitation de l'échantillon au cours de l'essai. Les séquences de capture de la caméra représentées à la Figure IV.8 montre que l'échantillon reste intact à la fin de l'essai.

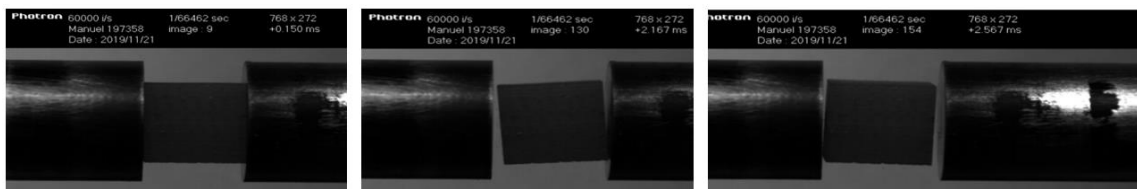


Figure IV.8 : Exemple de séquences de capture générées par la caméra ultra-rapide Photron Fastcam au cours d'un essai non endommageant.

IV.6. Variation des paramètres dynamiques en fonction de la vitesse de déformation

Dans cette partie, on traite l'effet de la vitesse de déformation dans la plage 200-590 s⁻¹ sur la variation des paramètres dynamiques des stratifiés GRE croisés (90°/0°)₂₀ en verre E/époxy tels que le module de compression, la contrainte maximale et déformation qui correspond à la contrainte maximale. Les courbes de la Figure IV.9 à la Figure IV.11 sont tracées des données expérimentales récapitulées au Tableau IV.1.

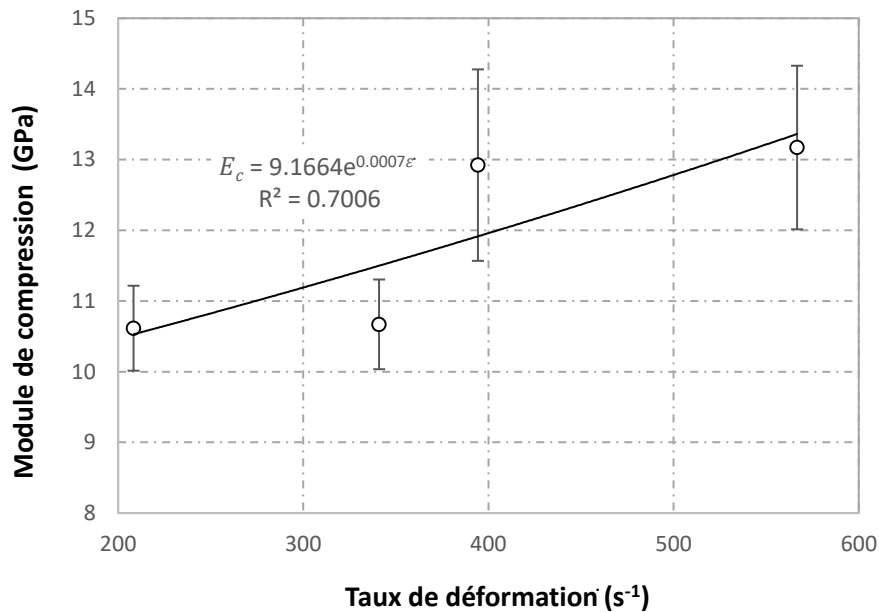


Figure IV.9 : Variation du module de compression en fonction du taux de déformation

De la Figure IV.9, on peut observer que le module de compression augmente avec le taux de déformation. Alors, le module de compression du stratifié dépend de la vitesse de déformation. Alors, dans la plage 200-590 s⁻¹ de cette étude, le module de compression a subi un durcissement en passant de 10,61 GPa à 13,17 GPa. Les valeurs du module de compression représente une dispersion vu la difficulté de leur détermination issue de la non-linéarité parfaite des première parties des courbes contrainte-déformation.

La Figure IV.10 illustre la variation de la contrainte maximale en fonction du taux de déformation dans la plage 200-590 s⁻¹ pour les stratifiés GRE croisés (90°/0°)₂₀. On note que la contrainte maximale augmente avec l'augmentation du taux de déformation. Dans l'intervalle 200-590 s⁻¹, la contrainte maximale passe de 110 MPa à 270 MPa.

Chapitre IV : Résultats expérimentaux et discussion

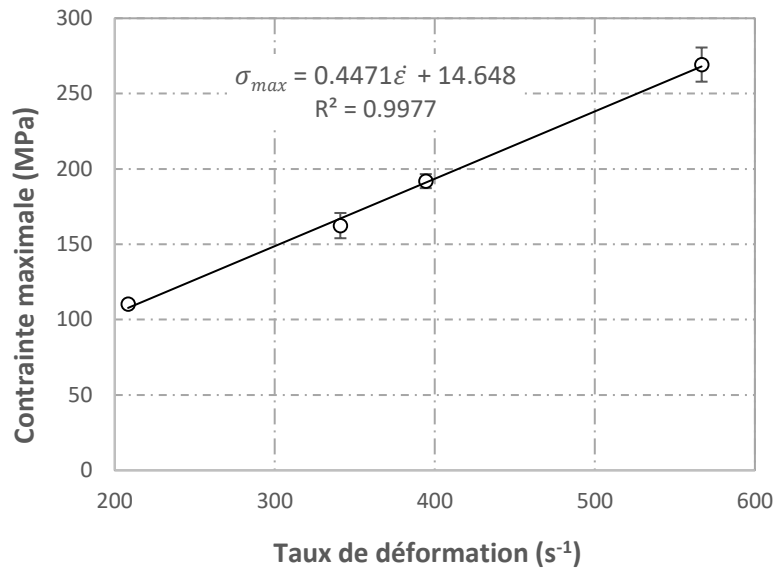


Figure IV.10 : Variation de la contrainte maximale en fonction du taux de déformation

La Figure IV.11 montre la variation de la déformation qui correspond à la contrainte maximale en fonction du taux de déformation dans la plage 200-590 s⁻¹ pour les stratifiés GRE croisés (90°/0°)₂₀.

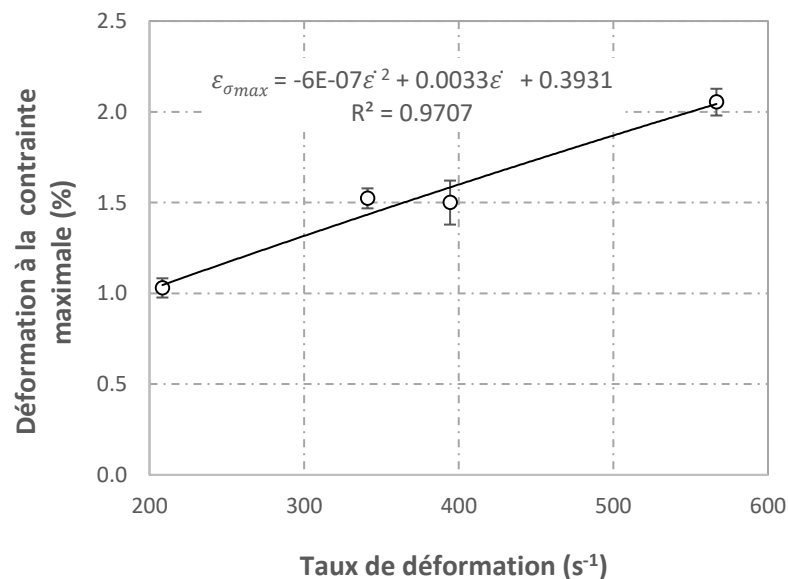


Figure IV.11 : Variation de la déformation à la contrainte maximale en fonction du taux de déformation.

On peut observer que la déformation à la contrainte maximale augmente aussi avec l'augmentation du taux de déformation. Dans l'intervalle 200-590 s⁻¹ de cette étude, la déformation à la contrainte maximale a passé de 1,03 % à 2,05%.

Conclusion Générale

Le travail de ce mémoire est un travail de recherche. Il porte sur l'étude expérimentale de l'effet du taux de déformation sur la réponse d'un stratifié croisé verre E/Epoxy sous compression dynamique.

Ce mémoire fait une revue des généralités sur les stratifiés, et sur les barres d'Hopkinson en termes de leur historique de développement, leur principe de fonctionnement et leurs équations de calcul ainsi que les approches de validité. Cela permet de déterminer de façon correcte les lois de comportement du stratifié croisé verre E/Epoxy étudié.

Vu les vastes domaines d'applications des composites où les pièces sont soumises à des conditions de chargement à long terme, il est essentiel de maîtriser le comportement de ces matériaux, en termes de propriétés mécaniques et de réponse aux sollicitations imposées afin de leurs garantir une durabilité de service. C'est dans ce sens qu'il est agencé notre PFE dont le matériau d'étude est un stratifié croisé en verre E/Epoxy.

En se basant sur les résultats obtenus dans cette étude et après vérification et confirmation de la répétabilité des résultats des essais, on a bien décelé en premier temps le comportement non endommageant de notre stratifié sous compression dynamique dans la gamme $200-590 \text{ s}^{-1}$. Les essais menés sous différentes pressions d'impact ont bien montré que les propriétés dynamiques voire le module de compression, la contrainte maximale et la déformation à la contrainte maximale sont directement proportionnelles à la vitesse de déformation. Des modèles empiriques ont été proposés pour les paramètres dynamiques en fonction du taux de déformation ce qui permet de les prédire dans la plage d'étude sans faire recours à l'expérimental qui coûte cher et prend du temps.

Compte tenu de la limitation du temps alloué à la préparation des PFEs, au stress et à l'angoisse causés par la pandémie du COVID 19, qui a sévi dans notre pays et qui a endeuillé plusieurs familles, notre projet n'a pas pu être poussé comme nous l'avions souhaité. De ce fait, nous espérons bien que la partie numérique de ce projet de recherche sera réalisée par d'autres futurs étudiants fin de cycle. Ce projet acquiert une importance bien particulière du fait qu'on a nos résultats expérimentaux qui nous permettent aux prochains travaux de valider, en premier temps, notre modèle numérique non endommageant développé en collaboration avec l'IRDL afin de pouvoir prédire la loi de comportement de ce stratifié croisé utilisé en structures navales sans faire recours à l'expérimental.

ملخص

سمح لنا هذا العمل التجريبي بدراسة مدى تأثير سرعة التشوه على استجابة صفائح الإيبوكسي المقوى بالزجاج "و" المتقاطعة تحت ضغط ديناميكي. لقد قمنا بمراجعة مكونات المركب المدروس ومجالات تطبيقه الواسعة وعملية إنتاجه. تعلمنا أيضًا مبدأ اختبار الضغط بجهاز هوبكنسون، تاريخه ومعادلاته الحسابية وكذا فرضيات صلاحيته. تم استخدام تقنيات تجريبية مختلفة كالتكليس وحساب النسب الكتلية والحجمية للتأكد من مادة الصفيحة المركبة المتقاطعة. تم أيضا دراسة السلوك اللين للصفائح في المجال 200-590 ث⁻¹. نتائج الخصائص الديناميكية أظهرت أنها تتناسب طرديًا مع سرعة التشوه. تم اقتراح نماذج تجريبية للتنبؤ بهذه الخصائص دون اللجوء إلى الإختبارات التجريبية والتي تعد مكلفة وتأخذ وقتًا طويلًا.

الكلمات المفتاحية: زجاج /إيبوكسي، الصفائح المتقاطعة، قضبان هوبكنسون، سرعة التشوه، الخصائص الحركية.

Abstract

This experimental investigation allowed us to study the strain rate effect on the response of an E-glass / epoxy cross-ply laminate under dynamic compression loadings. We have reviewed the constituents of the studied composite, its broad fields of application and its production process. We have also learned the principle of the Hopkinson bar compression test, its history, its governing equations and its validity approaches. Different experimental techniques were used such as calcination and calculation of the mass and volume fractions of the fibers in order to ensure the right cross-ply laminate. The behavior of the material is non-damaging in the range 200-590 s⁻¹. The results of the dynamic properties have shown that they were directly proportional to strain rate. Empirical models have been proposed to predict those parameters without resorting to the expensive and time-consuming experimental.

Keywords: GRE cross-ply laminates, SHPB, Strain rate, Low velocity impact, Dynamic properties.

Résumé

Ce travail expérimental nous a permis d'étudier l'effet du taux de déformation sur la réponse d'un stratifié croisé verre E/Epoxy sous compression dynamique. On a revu les constituants du composite étudié, ses vastes domaines d'application et son procédé d'obtention. On a également appris le principe de l'essai de compression par barre d'Hopkinson, son historique, ses équations de calcul et ses approches de validité. Différentes techniques expérimentales sont utilisées voire la calcination et le calcul des fractions massique et volumique des fibres afin de s'assurer du bon stratifié croisé. Le comportement du matériau est bien non endommageant dans la gamme 200-590 s⁻¹. Les résultats des propriétés dynamiques ont montré quelles sont directement proportionnelles à la vitesse de déformation. Des modèles empiriques ont été proposés afin de prédire ses propriétés sans faire recours à l'expérimental qui coûte cher et prend du temps.

Mots clés : Composites GRE, Stratifiés croisés, Barres d'Hopkinson, Propriétés dynamiques.